Méthode de caractérisation systémique du fonctionnement de la vigne à partir de l'évaluation des effets combinés du milieu et des pratiques culturales pour prévoir les types de vins

Cécile Coulon

▶ **To cite this version:**

Cécile Coulon. Méthode de caractérisation systémique du fonctionnement de la vigne à partir de l'évaluation des effets combinés du milieu et des pratiques culturales pour prévoir les types de vins. Agronomie. Université d'Angers, 2012. Français. NNT : . tel-00989784

HAL Id: tel-00989784

https://theses.hal.science/tel-00989784

Submitted on 12 May 2014

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.

2012

MÉTHODE DE CARACTÉRISATION SYSTÉMIQUE DU FONCTIONNEMENT DE LA VIGNE, À PARTIR DE L'ÉVALUATION DES EFFETS COMBINÉS DU MILIEU ET DES PRATIQUES CULTURALES, POUR PRÉVOIR LES TYPES DE VINS.

THÈSE DE DOCTORAT
Spécialité : Sciences Agronomiques

ÉCOLE DOCTORALE Végétal, Environnement, Nutrition, Agroalimentaire, Mer

présentée et soutenue publiquement
le : 11 mai 2012
à : Angers
par : **Cécile COULON**

Devant le jury ci-dessous :

Aziz Ballouche	Professeur, Université d'Angers	Président
Jean-Marc Meynard	Directeur de Recherche, INRA Thiverval-Grignon	Rapporteur
Cornelis Van Leeuwen	Professeur, Bordeaux Sciences Agro	Rapporteur
Nathalie Perrot	Directrice de Recherche, INRA Thiverval-Grignon	Examinatrice
Stéphane Burgos	Enseignant-Chercheur, Ecole de Changins, Suisse	Examinateur
René Morlat	Directeur de recherche, INRA Angers-Nantes	Examinateur
Marie Thiollet-Scholtus	Ingénieur de Recherche, INRA Angers-Nantes	Examinatrice
Gérard Barbeau	Ingénieur de Recherche, INRA Angers-Nantes	Invité

Directeur de thèse : René Morlat
Co-encadrement : Marie Thiollet-Scholtus et Gérard Barbeau

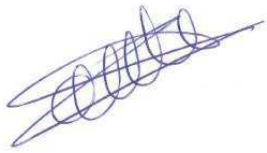
Projet soutenu par l'attribution d'une allocation doctorale
du département SAD de l'INRA et de la Région Pays de la Loire
et l'appui financier d'Interloire

INRA Angers-Nantes
UE 1117 Vigne et Vin
UMT Vinitera
42, rue Georges Morel
49071 BEAUCOUZE – Cedex

ENGAGEMENT DE NON PLAGIAT

Je, soussignée **Cécile COULON,** déclare être pleinement consciente que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publiés sur toutes formes de support, y compris l'internet, constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée. En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour écrire ce manuscrit de thèse.

Signature :



« On ne fait jamais attention à ce qui a été fait, on ne voit que ce qui reste à faire. »

Marie Curie

« Ce qui est simple est toujours faux. Ce qui ne l'est pas est inutilisable. »

Paul Valery

Remerciements

Mes premiers remerciements sont avant tout destinés à mes trois encadrants. Merci à René Morlat, jeune retraité, qui a accepté de diriger cette thèse, sans qui ce projet n'aurait pu se concrétiser, qui a su me faire part de ses précieux conseils tout au long de ces trois ans et qui a passé de nombreuses heures à relire ce manuscrit. Merci à Marie Thiollet-Scholtus pour le suivi tout au long de ces trois ans, de la rédaction du sujet à la relecture du manuscrit, et pour nos nombreux échanges. Merci à Gérard Barbeau pour avoir mis tout en œuvre pour que le souhait de faire une thèse, qui a émergé en 2006, ait pu voir le jour, notamment pour la recherche de financements, je le remercie pour ses conseils et la relecture du manuscrit.

Merci aux financeurs : le département INRA-SAD, la région Pays de la Loire et Interloire.

Je remercie les membres du comité de thèse : Marianne Le Bail, Jean-Marc Barbier, Christian Bosckstaller, Christian Gary et Lionel Dumas-Lattaque pour leurs précieux conseils et la richesse des discussions au cours de nos rencontres régulières. Merci d'avoir guidé les choix scientifiques et de m'avoir permis de prendre du recul vis à vis de mon travail.

Ce travail a bénéficié de collaborations actives et fructueuses. Je ne sais comment remercier Brigitte Charnomordic et Serge Guillaume qui ont permis la réalisation d'une importante partie de cette thèse et qui m'ont initiée à l'écriture d'un article scientifique. Je les remercie aussi de m'avoir convertie à R. Merci au personnel de la Cellule Terroirs Viticoles : à Dominique Rioux pour sa participation aux traitements des données, Vincent Courtin pour nos échanges concernant les facteurs du milieu et Sébastien Cesbron pour son aide à l'utilisation de Géoconcept. Merci à Marie Gilson et Eric Laurent de la Cave des Vignerons de Saumur pour nos échanges et avoir accepté que je travaille à partir de leurs données. Je souhaite également remercier Christel Renaud pour le travail commun que nous avons mené pour construire des typologies 'produit raisin/vin' et nos discussions. J'en profite pour remercier les experts qui ont participé à cette étape de travail. Je remercie Yves Cadot pour notre travail sur le réseau Cabernet franc et qui n'a pas hésité à m'apporter son regard critique suite à la lecture du manuscrit. Merci aux stagiaires qui ont participé à ce travail.

Un grand merci à l'ensemble du personnel de l'UVV, de l'IFV et de la CTV qui contribue à la bonne humeur environnante au travail scientifique. Merci à Séverine Roger Julien pour les sorties 'terrain' et 'piscine', et aux « filles du labo » Marie-Hélène Bouvet, Réjane Champenois et Anne Mège pour avoir remis le nez dans d'anciennes bases de données. Merci à Fabienne Jourdan pour son appui administratif et l'initiation à l'aqua-jogging.

Je remercie les différents chercheurs avec qui j'ai pu discuter, lors notamment des réunions du groupe MODELISAD, du groupe MODELIA et des agronomes du SAD. Merci à tous les chercheurs de l'INRA qui s'impliquent dans l'animation pour les doctorants que ce soit les journées des doctorants ou les réflexives. Merci à Bernadette Leclerc pour l'aide qu'elle nous a apportée au cours des différents ateliers d'écriture.

Enfin, j'adresse mes remerciements les plus sincères aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail : les rapporteurs Jean-Marc Meynard et Cornelis Van Leeuwen, et les examinateurs Nathalie Perrot, Aziz Ballouche et Stéphane Burgos.

Plus généralement, merci à tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont aidée et soutenue pour mener à bien ce travail de thèse, je vous en suis très reconnaissante.

Valorisation des travaux de recherche :

Articles publiés dans des revues à comité de lecture :

- Coulon C., Charnomordic B., Rioux D., Thiollet-Scholtus M., Guillaume S.. Prediction of vine vigor and precocity using data and knowledge-based fuzzy experts systems. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin: *in press.*
- Coulon C., Morlat R., Barbeau G., Gary C., Thiollet-Scholtus M.. A conceptual representation of the jointed effects of environmental factors and agricultural practices on vine quality. Sustainable Agriculture Reviews: *in press.*
- Coulon C., Ganenco A., Neethling E., Thiollet-Scholtus M., 2011. Méthode de typologie d'années climatiques de référence à l'usage de la modélisation. Application à la moyenne Vallée de la Loire. Progrès Agricole et Viticole 17-2011: 347-353.

Articles dans des revues sans comité de lecture :

- Coulon C., Quénol H., Garcia de Cortazar Atauri I., Barbeau G., 2009. La modélisation un outil de pilotage du couple climat-vigne ? Revue Française d'Oenologie 235: 15-22.
- Barbeau G., Coulon C., Neethling E., Bonnefoy C., Quénol H., 2011. Le changement climatique et les interactions sol-climat. Revue des Géologues 168: 28-29.

Articles en cours :

- Coulon C., Charnomordic B., Loisel P., Thiollet-Scholtus M., Guillaume S.. Use of fuzzy learning procedure to evaluate the jointed effect of environmental factors and cultural practices on vine vegetative development. (revue : Computers and Electronics in Agriculture)
- Coulon C., Cadot Y., Thiollet-Scholtus M., Renaud C., Barbeau G. A method linking vine functioning and wine style to built decision support aid tools usable by winegrowers and extension agents. (revue : Agriculture and Food)
- Guillaume S., Charnomordic B., Loisel P., Coulon C. Hybrid error index for imprecise outputs. (revue : Fuzzy Sets and Systems).

Communications dans des congrès :

- Coulon C., Thiollet-Scholtus M., Charnomordic B., Guillaume S., Barbeau G., 2012. Vine vigor modelling according to perennial and semi-perennial practices. IXe Congrès International des Terroirs Viticoles, Reims-Dijon, France.
- Coulon C., Barbeau G., Morlat R., Thiollet-Scholtus M., 2010. Design of a model to predict berry composition and wine style according to soil factors, climate and winegrowers' practices. Agro 2010 the XIth ESA Congress, Montpellier, France. (Poster).
- Coulon C., Rioux D., Guillaume S., Charnomordic B., Barbeau G., Thiollet-Scholtus M., 2010. Design of an indicator of vine vigor potential conferred by soil (VIPOS), using a

fuzzy expert system. VIIIe Congrès International des Terroirs Viticoles, Soave, Italie. (Poster).

- Coulon C., Barbeau G., 2009. Assessment of factors affecting berry composition and wine characteristics by CHAID analysis. 16th International GESCO Symposium, Davis, USA. (Poster).
- Neethling E., Coulon C., Barbeau G., Courtin V., Bonnefoy C., Quénol H., 2012. Viticultural strategies to adapt to climate change: Temporal and spatial changes in land use and crop practices. Xth European IFSA Symposium, Aarhus, Danemark. (Oral).

Communication lors de colloques, séminaires et journées techniques :

- Coulon C., 2011. Validation d'indicateurs de vigueur, précocité et contrainte hydrique couplant les facteurs du milieu et les pratiques agro-viticoles. La recherche vous parle, Journée Interloire, Saumur, France. (Oral).
- Coulon C., Barbeau G., 2010. Pratiques agro-viticoles et qualité des moûts. Journées Techniques Viticulture Biologique, Angers, France. (Oral).
- Thiollet-Scholtus, M., Coulon C., Morlat R., 2009. Quels itinéraires agro-viticoles pour quelles familles de vin ? Colloque Euroviti, Angers, France. (Oral).
- Thiollet-Scholtus, M., Coulon C., Morlat R., 2009. Relationship between practices and terroir for hight quality grapes. 16th International GESCO Symposium, Davis, USA. (Poster).

Communication lors de colloques, séminaires et journées scientifiques :

- Coulon C., 2011. Méthode d'analyse systémique des caractéristiques sensorielles des vins suivant l'effet combiné du milieu et des pratiques. Journées Scientifiques de l'Ecole Doctorale VENAM. (Oral).
- Coulon C., 2010. Modèle de prédiction de la composition du raisin du type de vin, selon les facteurs du milieu et les pratiques du vigneron : une approche systémique. Séminaire UMT Vinitera. (Oral).
- Coulon C., 2010. Construction d'un modèle liant le couple facteurs du milieu / pratiques du viticulteur à la composition du raisin et au type de vin à privilégier. Une approche systémique. Journée des doctorants de l'IFR Quasav. (Oral).
- Coulon C., 2010. Prédiction de la composition du raisin en fonction des facteurs du milieu (sol, sous-sol et climat) et des pratiques agro-viticoles. Assemblée Générale du département SAD de l'INRA. (Poster).
- Coulon C., 2010. Construction d'un outil d'aide à la décision pour produire des vins aux caractéristiques sensorielles liées au couple facteurs du milieu/itinéraires techniques. Forum des doctorants de l'Ecole Doctorale VENAM. (Poster).

Table des matières

Index des Abréviations....13
Index des Figures....15
Index des Tableaux....20
Introduction générale....27
Partie1.Contexte de la thèse et démarche méthodologique....31
Chapitre1.Des milieux et des pratiques à l'origine des vins....31
1.Les pratiques culturales au cœur du système de production....31
2.Des pratiques culturales pour un objectif de production défini....34
3.Une évolution des études terroir....35
4.Une démarche de modélisation systémique à mettre en œuvre....36
5.Problématique et objectifs de la thèse....39
Chapitre2.Une méthode d'analyse systémique....41
Chapitre3.Le concept d'itinéraire de fonctionnement de la vigne....45
1.Définition du concept....45
2.La vigueur et la précocité : deux variables clés....45
2.1.La vigueur....45
2.2.La précocité....48
3.Le rôle de l'alimentation hydrique....49
4.Du modèle conceptuel au modèle opérationnel....51
Partie2.Construction des principales variables de l'itinéraire de fonctionnement de la vigne....58
Chapitre1.Prédiction de la vigueur et de la précocité en fonction des facteurs du milieu....58
1.Variables et agrégation des variables....59
1.1.Vigueur....59
1.2.Précocité....62
1.3.Bases de données utilisées....64
1.4.Nouvelle agrégation de variables....64
2.La méthode des systèmes d'inférence floue....66
3.Évaluation et validation du système construit....68
4.Partitionnement flou des variables....69
5.Génération des règles de décision agrégeant les variables....72
6.Étude du fonctionnement du système construit....74
7.Analyse de la sensibilité des paramètres des partitions....76
8.Validation et utilisation du système construit....78
9.Comparaison des méthodes d'agrégation....79
10.Conclusion....82
Chapitre2.Prédiction de la vigueur en fonction des facteurs du milieu et des pratiques....83
1.Résultats préliminaires....83
2.Données utilisées et étapes méthodologiques....85
3.Description du cas d'étude et sélection des données d'apprentissage....87
4.Méthode d'inférence floue....94
4.1.Partitionnement flou des variables d'entrée....94

4.2.Génération des règles de décision agrégeant les variables....94
4.3.Optimisation des paramètres et des conclusions des règles....95
5.Caractéristiques du jeu de données d'apprentissage....96
6.Construction du système d'inférence floue....99
7.Analyse du fonctionnement du système d'inférence floue....104
8.Conclusion....109
Partie3.Itinéraires de fonctionnement et typologie 'produit raisin/vin'....114
Chapitre1.Identification d'itinéraires de fonctionnement....116
1.Facteurs du milieu et pratiques mises en œuvre sur les parcelles d'étude....116
2.Calcul des variables de fonctionnement des parcelles d'étude....117
3.Caractérisation des itinéraires de fonctionnement....118
3.1.Développement végétatif et reproducteur de la vigne 119
3.2.Précocité du développement de la vigne....125
3.3.Alimentation hydrique....130
3.4.Combinaisons des variables caractérisant le fonctionnement de la vigne....134
Chapitre2.Identification de types de 'produit raisin/vin'....137
1.Méthodologie de caractérisation des types de 'produit raisin/vin'....137
2.Identification des types par expertise de professionnels....138
3.Application et validation de la typologie aux parcelles d'étude....141
3.1.Deux méthodes d'évaluations sensorielles prises en compte 141
3.2.Caractérisation des types par un jury de professionnels....144
3.3.Confrontation de la typologie des professionnels aux évaluations du jury expert....148
Chapitre3.Correspondance entre itinéraires de fonctionnement et types de produits 151
Partie4.Discussion générale, perspectives....160
Chapitre1.Rappels des objectifs de la thèse....160
Chapitre2.Apports et limites de notre démarche....161
1.Sur le choix du mode de conceptualisation et du type de modélisation 161
2.Sur l'utilisation des systèmes d'inférence floue....162
3.Sur la caractérisation du 'produit raisin/vin'....165
4.Sur la prédiction du type de 'produit raisin/vin'....166
Chapitre3.Perspectives....168
Conclusion....174
Références bibliographiques....178
Annexes....200

Index des Abréviations

ALT : Altitude
AOC : Appellation d'origine contrôlée
CPS : Cailloux sur le profil du sol
CSS : Couleur de surface du sol
DN : Drainage naturel
DRM : Dureté de la roche-mère
E : Epaisseur du sol
EXP : Exposition
h : Epaisseur d'un horizon du sol
HCC : Humidité à la capacité au champ
HPF : Humidité au point de flétrissement
NDVI : Normalized Different Vegetation Index
NPPT : Note de potentiel de précocité du terroir
NPVT : Note de potentiel du vigueur du terroir
OIV : Organisation Internationale de la Vigne et du Vin
OP : Ouverture du paysage
PIC : Profondeur du pic racinaire
RUM : Réserve utile en eau maximale
SIF : Système d'inférence floue
STICS : Simulateur multidisciplinaire pour les cultures standards
TF : Pourcentage de terre fine
TOP : Topographie
UTB : Unité Terroir de Base
UTV : Unité Terroir Viticole
VIG_ITK : Vigueur liée aux facteurs du milieu et aux pratiques culturales
VIG_MIL : Vigueur liée aux facteurs du milieu

Index des Figures

Figure 1 : Représentation de la construction de la qualité du raisin et du vin. 33

Figure 2 : Représentation schématique des relations entre les trois sous-systèmes constitutifs du système de production viticole (Le Gal et al., 2009, modifié).....37

Figure 3 : Illustration du concept d'itinéraire de fonctionnement. Suivant les conditions climatiques de l'année, une même parcelle peut avoir des itinéraires de fonctionnement différents. Ces itinéraires de fonctionnement conduiront à des types de raisin différents. Un même type de raisin peut-être obtenu avec différents itinéraires de fonctionnement.....51

Figure 4 : Démarche de caractérisation des itinéraires de fonctionnement. La démarche vise à caractériser l'impact des facteurs permanents (milieu physique et pratiques culturales pérennes ou semi-pérennes) sur les deux variables de fonctionnement : 'niveau de vigueur' et 'précocité' puis l'impact du climat de l'année sur la variable de fonctionnement 'contrainte hydrique'. Les différentes combinaisons des niveaux des variables de fonctionnement (deux niveaux pris en compte ici) définissent différents itinéraires de fonctionnement. Ces itinéraires de fonctionnement caractérisent le fonctionnement des parcelles.....53

Figure 5 : Nouvelle architecture du système avec les variables d'entrée utilisées pour estimer les quatre variables de sortie : la vigueur de la vigne, le mésoclimat thermique, le pédoclimat thermique et la précocité du cycle végétatif de la vigne. Les caractéristiques des variables (continues ou discrètes) sont indiquées. Les variables d'entrée sont pondérées (les poids sont indiqués à côté des flèches) et agrégées en utilisant des systèmes d'inférence floue.....65

Figure 6 : Exemple de trois ensembles flous définis pour le même domaine de variation. 'x': un point du domaine de variation μF(x): le degré d'appartenance à l'ensemble flou 'Faible', μM(x): le degré d'appartenance à l'ensemble flou 'Moyen'.....66

Figure 7 : Paramètres des partitions d'une variable en deux ensembles flous : C1 et C2.....67

Figure 8 : Histogrammes montrant les distributions des variables d'entrée et leurs partitions floues pour la base de données de Saumur. Les valeurs entre parenthèses correspondent aux (minimum, premier paramètre flou C1, second paramètre flou C2, maximum). Les intervalles des classes sont déterminés suivant la méthode de Sturges (1926). RUM : réserve en eau utile maximale, CPS : pourcentage de cailloux sur le profil, DRM : dureté de la roche-mère, ALT : altitude, EXP : exposition, OP : ouverture du paysage, HCC : humidité à la capacité au champ, DN : drainage naturel, CSS : couleur de la surface du sol, PIC : profondeur d'enracinement maximal.....71

Figure 9 : Histogrammes montrant les distributions des valeurs des variables composites construites. VIG_MIL : vigueur liée aux facteurs du milieu, MES : mésoclimat thermique, PED : pédoclimat thermique, PRE_MIL : précocité liée aux facteurs du milieu. Les intervalles des classes ont été déterminés suivant la

méthode de Sturges (1926).....75

Figure 10 : Estimation de la vigueur liée aux facteurs du milieu. Variable 'NPVT' calculée suivant l'ancienne méthode de calcul de Morlat et al. (2001) (schéma de gauche) et suivant la nouvelle méthode, variable 'VIG_MIL' (schéma de droite). Les valeurs de NPVT et VIG_MIL sont générées pour plusieurs valeurs de RUM : la réserve en eau utile maximale du sol et de CPS : le pourcentage de cailloux sur le profil du sol, en considérant une dureté de la roche-mère intermédiaire. Les valeurs de NPVT sont ramenées à une échelle comprise entre 1 et 3.....75

Figure 11 : Impact individuel de chaque variable d'entrée sur les valeurs de la variable de sortie. (VIG_MIL : vigueur liée aux facteurs du milieu, MES : mésoclimat thermique, PED : pédoclimat thermique, PRE_MIL : précocité liée aux facteurs du milieu, RUM : réserve en eau maximale du sol, CPS : pourcentage de cailloux sur le profil, DRM : dureté de la roche-mère, HCC : humidité à la capacité au champ, DN : drainage naturel, CSS : couleur de la surface du sol, ALT : altitude, EXP : exposition, OP : ouverture du paysage, PIC : profondeur d'enracinement maximal), min : minimum, C1 et C2 : paramètres flous, max : maximum. Trois combinaisons des valeurs des variables d'entrée fixées sont considérées, ce qui correspond aux trois courbes : valeur fixée pour prédire la plus faible valeur de la variable de sortie (courbe du bas), la plus forte (courbe du haut) et valeur qui correspond à l'intersection entre les deux ensembles flous (courbe intermédiaire).....78

Figure 12 : Histogrammes montrant les distributions des variables d'entrée et leur partitionnement flou pour le vignoble du Douro caractérisé. Les valeurs entre parenthèses correspondent aux (minimum, paramètre C1, paramètre C2, maximum). Les intervalles des classes sont déterminés suivant la méthode de Sturges (1926). RUM : réserve en eau maximale du sol, CPS : pourcentage de cailloux sur le profil du sol, HCC : humidité à la capacité au champ, ALT : altitude. Les lignes verticales en pointillés correspondent aux limites des classes de l'ancienne méthode. 80

Figure 13 : Estimation de la précocité pour un vignoble situé dans le Douro (Portugal). Carte (a) : ancienne méthode de calcul, carte (b) : ancienne méthode de calcul corrigée par expertise, carte (c) : nouvelle méthode de calcul. Situation 1 : glacis avec des sols profonds et sableux: situation 2 : schistes altérés avec des teneurs élevées en argiles et d'importants mouvements d'eau en profondeur avant le débourrement de la vigne. Les situations 1 et 2 sont des zones à faible précocité non détectée par l'ancienne méthode.....81

Figure 14 : Exemple de maillage des points de références géo-pédologiques et de caractérisation de l'environnement paysager. Les parcelles des viticulteurs sont localisées. Les plages de couleur correspondent aux niveaux de vigueur prédits (variable VIG_MIL, de 'Faible' en gris clair à 'Fort' en gris foncé); (données sources : Cellule Terroirs Viticoles).....85

Figure 15 : Étapes méthodologiques utilisées pour développer les procédures d'apprentissage automatique afin d'évaluer l'effet conjoint des facteurs du milieu et des pratiques culturales sur la vigueur de la vigne.....86

Figure 16 : Distribution des valeurs de surface d'enherbement, densité des herbes sur la bande enherbée et pourcentage de couverture résultante, pour les 152 parcelles d'étude. Les intervalles des classes sont déterminés suivant la méthode de Sturges (1926).....92

Figure 17 : Méthode de sélection des données d'apprentissage.....93

Figure 18 : Représentation incertaine de la valeur de sortie utilisée comme donnée d'apprentissage (la vigueur de la vigne observée par l'expert). Chaque valeur brute donnée par l'expert (lignes en pointillés) est remplacée par une classe représentée par des nombres flous (lignes pleines).....96

Figure 19 : Distribution des niveaux de vigueur du jeu de données initial des 152 parcelles (en gris clair) et du jeu de données D3 correspondant aux 78 parcelles sélectionnées (en gris foncé).....97

Figure 20 : Partitionnement flou de VIG_MIL (vigueur liée aux facteurs du milieu) selon trois partitions. En abscisse les valeurs prises par VIG_MIL, en ordonné le degré d'appartenance aux ensembles flous.....100

Figure 21 : Partitionnement flou de VIG_PG (vigueur conférée par le porte-greffe) selon quatre partitions. En abscisse les valeurs prises par VIG_PG, en ordonné le degré d'appartenance aux ensembles flous. 101

Figure 22 : Partitionnement flou de VIG_C (contrainte sur la vigueur exercée par le mode d'entretien du sol) selon trois partitions. En abscisse les valeurs prises par VIG_C, en ordonné le degré d'appartenance aux ensembles flous.....101

Figure 23 : Performance du système d'inférence floue (SIF) sur un jeu de donnée élargi. Les 78 parcelles correspondent au jeu de donnée D3 ayant servi à construire le SIF.....104

Figure 24 : Evolution de la vigueur prédite selon les systèmes d'inférence floue optimisés avec, soit une valeur nette de la vigueur observée, soit une valeur floue. Ceci, en fonction des trois variables d'entrée : la vigueur liée aux facteurs du milieu VIG_MIL (représentée en abscisse), la vigueur conférée par le porte-greffe VIG_PG et la concurrence de l'entretien du sol sur la vigueur VIG_C.....106

Figure 25 : Localisation des quatorze parcelles d'étude. Les délimitations des zones en Appellation d'Origine Contrôlée sont représentées en grisé.....116

Figure 26 : Caractérisation du poids de bois de taille (PBT), de la surface foliaire exposée (SFE), du poids de récolte (RE), du rapport surface foliaire exposée / poids de récolte (SFE/RE) et de la puissance (PUI) pour chacune des quatorze parcelles d'étude et pour les deux millésimes : 2002 (carré blanc) et 2005 (rond noir). Toutes les valeurs initiales sont disponibles en annexe 7.....120

Figure 27 : Dendogramme issu de la Classification Ascendante Hiérarchique réalisée à partir des valeurs des cinq variables suivantes : le poids de bois de taille, la surface foliaire exposée, le poids de récolte, le rapport entre la surface foliaire et le poids de récolte et la puissance, pour les quatorze parcelles et les deux années (2002 et 2005) de suivis. Le trait vertical indique le niveau de coupure permettant un

partitionnement optimal, trois groupes sont obtenus : DEV1, DEV2 et DEV3.....121

Figure 28 : Représentation des individus (couples 'parcelle-année') par Analyse en Composantes Principales des valeurs des cinq variables suivantes : le poids de bois de taille, la surface foliaire exposée, le poids de récolte, le rapport entre la surface foliaire et le poids de récolte et la puissance, pour les quatorze parcelles et les deux années (2002 et 2005) de suivis. Les groupes de la Classification Ascendante Hiérarchique et leur barycentre sont indiqués : DEV1, DEV2 et DEV3.....122

Figure 29 : Mise en relation des valeurs moyennes (pour 2002 et 2005) des poids de bois de taille (PBT) et des valeurs de la variable composite caractérisant la vigueur induite par les facteurs du milieu et les pratiques (VIG_ITK), pour les quatorze parcelles d'étude. La diagonale correspond à la correspondance des valeurs de la variable VIG_ITK avec celles des poids de bois de taille établie lors de la construction de VIG_ITK.....125

Figure 30 : Indices de précocité de débourrement (P_iD), de floraison (P_iF), de véraison (P_iV) et de maturité (P_iM) calculés pour chacune des quatorze parcelles d'étude et pour les deux millésimes : 2002 (carré blanc) et 2005 (rond noir). Toutes les valeurs initiales sont disponibles en annexe 6.....126

Figure 31 : Dendogramme issu de la Classification Ascendante Hiérarchique réalisée à partir des valeurs des quatre indices de précocité (de débourrement, de floraison, de véraison et de maturité), pour les quatorze parcelles et les deux années (2002 et 2005) de suivis. Le trait vertical indique le niveau de coupure permettant un partitionnement optimal, trois groupes sont obtenus : PRE1, PRE2 et PRE3.....127

Figure 32 : Représentation des individus (couples 'parcelle-année') par Analyse en Composantes Principales des valeurs des quatre indices de précocité (de débourrement, de floraison, de véraison et de maturité), pour les quatorze parcelles et les deux années (2002 et 2005) de suivis. Les groupes de la Classification Ascendante Hiérarchique et leur barycentre sont indiqués : PRE1, PRE2 et PRE3.....128

Figure 33 : Mise en relation de la date de débourrement prédit par le modèle de culture STICS-Vigne en 2005 et des valeurs de la variables composites caractérisant la précocité induite par les facteurs du milieu (PRE_MIL) pour les 11 parcelles non enherbées 130

Figure 34 : Valeurs des rapports isotopiques C13/C12 pour chacune des quatorze parcelles d'étude et pour les deux millésimes : 2002 (carré blanc) et 2005 (rond noir).....134

Figure 35 : Localisation des neufs experts (OENO : oenologue, CONS : technicien ou conseiller viticole, VITI : viticulteur) interrogés pour construire la typologie 'produit raisin/vin' et de leur zone d'action (Source de la carte : Technoresto.org).....137

Figure 36 : Partitionnement flou des critères permettant de caractériser le type de produit. Chaque critère est partitionné en deux ensembles flous et noté de 0 à 10.....144

Figure 37 : Consensus entre les juges du jury de professionnels, pour chaque critère, évalué à partir d'une

analyse en composante principale réalisée pour chaque critère et chaque année (2002 et 2005) en considérant les vins des parcelles comme des individus et les juges comme des variables.....148

Figure 38 : Mise en relation de l'appartenance au type 'Fruité – Corsé – Tanins Secs' (FCS) et au type 'Végétal – Léger' (VL). Les valeurs correspondent à l'écart entre le pourcentage d'appartenance au type du couple 'parcelle-année' considéré et le pourcentage moyen d'appartenance au type pour l'ensemble des couples 'parcelle-année'.....152

Index des Tableaux

Tableau 1 : Pratiques pérennes, semi-pérennes et annuelles imposées par la réglementation et le cahier des charges régissant les deux AOC « Saumur » et « Cabernet de Saumur » (décret n° 2011-1360 du 24 octobre 2011, JORF du 27 octobre 2011) et celles que peut choisir le viticulteur.....32

Tableau 2 : Catégories prises en compte pour évaluer la dureté de la roche-mère (DRM) déterminée, suivant la nomenclature pédologique (Baize et al., 2008) et le type de roche-mère.....60

Tableau 3 : Eléments de calcul de la note de potentiel de vigueur (NPVT), selon Morlat et al. (2001).....61

Tableau 4 : Eléments de calcul de la note de potentiel de précocité (NPPT), selon Morlat et al. (2001)....63

Tableau 5 : Caractéristiques des bases de données utilisées pour élaborer et valider la méthode.....64

Tableau 6 : Règles de décision de la variable VIG_MIL : vigueur liée aux facteurs du milieu. RUM : réserve en eau utile maximale du sol, CPS : pourcentage de cailloux sur le profil du sol, DRM : dureté de la roche-mère. En grisé le mode de calcul pour transposer les relations de l'ancienne méthode.....72

Tableau 7 : Règles de décision de la variable PED : pédoclimat thermique. HCC : humidité à la capacité au champ, DN : drainage naturel, CSS : couleur de la surface du sol.....72

Tableau 8 : Règles de décision de la variable MES : mésoclimat thermique. TOP : topographie, ALT : altitude, EXP : exposition, OP : ouverture du paysage; Top 1 : thalweg ou bas de pente, Top 2 : autre topographie. 73

Tableau 9 : Règles de décision de la variable PRE_MIL : précocité liée aux facteurs du milieu. VIG_MIL : évaluation du niveau de vigueur, PED : pédoclimat thermique, MES : mésoclimat thermique, MRD : profondeur de densité racinaire maximale.....73

Tableau 10 : Valeurs des paramètres, pour les variables continues, utilisées dans l'analyse de sensibilité (RUM : réserve en eau utile maximale du sol, CPS : pourcentage de cailloux sur le profil du sol, HCC : humidité à la capacité au champ et ALT : altitude).....76

Tableau 11 : Variation des valeurs des variables de sortie (VIG_MIL : la vigueur liée aux facteurs du milieu, PED : le pédoclimat thermique et MES : le mésoclimat thermique) lorsque que les valeurs des paramètres C1 et C2 des variables d'entrée continues (RUM : réserve utile en eau maximale du sol, CPS : pourcentage de cailloux sur le profil du sol, HCC : humidité à la capacité au champ et ALT : altitude) varient de plus ou moins 20%.....77

Tableau 12 : Unités Terroir de base prises en compte dans l'étude.....88

Tableau 13 : Vigueur conférée suivant le porte-greffe, d'après Galet (1998), Institut Français de la Vigne et du Vin et al. (2007) et la synthèse des techniciciens du Val de Loire utilisée par la Cellule Terroirs Viticoles.....90

Tableau 14 : Intensité de concurrence de l'enherbement en fonction de l'espèce présente. Références : 1 : Chambre d'Agriculture de Rhônes-Alpes (2011); 2 : TECHN'ITAB (2003); 3 : Comité de développement du Beaujolais (2011); 4 : Chambre d'Agriculture de la Gironde (2006) ; 5 : Centre technique interprofessionnel de la vigne et du vin (2002) ; 6 : Delabays et al. (2006); 7 : Celette (2007).....91

Tableau 15 : Intensité de concurrence produite par l'enherbement vis-à-vis de la vigueur (VIG_C).....92

Tableau 16 : Jeux de données obtenus suite aux dix classifications k-means. Le nombre de fois minimum où les parcelles sont dans le même groupe, au cours des dix classifications, est indiqué, entre parenthèses, à côté de l'identifiant du jeu de données. * : jeu de données sélectionné.....97

Tableau 17 : Caractéristiques des groupes obtenus suite à la sélection des parcelles au moins huit fois dans le même groupe au cours des dix classifications k-means. * : groupes sélectionnés. VIG_OBS : vigueur observée, VIG_MIL : vigueur liée aux facteurs du milieu, VIG_PG : vigueur conférée par le porte-greffe, VIG_C : concurrence de l'entretien du sol sur la vigueur. Var. : variance; moy. : moyenne.....98

Tableau 18 : Performances moyennes du système avant et après optimisation, sur les données de validation (10 jeux de données de 23 parcelles).....99

Tableau 19 : Paramètres des partitions de VIG_MIL (vigueur liée aux facteurs du milieu) pour le système d'inférence floue (SIF) initial non optimisé, optimisé avec une sortie nette ou avec une sortie floue.....100

Tableau 20 : Paramètres des partitions de VIG_PG (vigueur conférée par le porte-greffe) pour le système d'inférence floue (SIF) initial non optimisé, optimisé avec une sortie nette ou avec une sortie floue.....100

Tableau 21 : Paramètres des partitions de VIG_C (contrainte sur la vigueur exercée par le mode d'entretien du sol) pour le système d'inférence floue (SIF) non optimisé, optimisé avec une sortie nette ou avec une sortie floue.....101

Tableau 22 : Valeurs de sortie des règles combinant les trois variables d'entrée VIG_MIL, VIG_PG et VIG_C et nombre de parcelles activant chaque règle de décision. Fa: faible, M : moyenne, Fo: forte, Tfo : très forte.....103

Tableau 23 : Valeurs, pour les 14 parcelles d'étude, des variables composites suivantes : la vigueur liée aux facteurs du milieu (VIG_MIL), le pédoclimat thermique (PED), le mésoclimat thermique (MES), la précocité liée aux facteurs du milieu (PRE_MIL) et la vigueur liée aux facteurs du milieu et aux pratiques (VIG_ITK).....118

Tableau 24 : Coordonnées et contributions des cinq variables suivantes : le poids de bois de taille (PBT),

la surface foliaire exposée (SFE), le poids de récolte (RE), le rapport entre la surface foliaire et le poids de récolte (SFE/RE) et la puissance (PUI), pour les deux premières dimensions de l'Analyse en Composantes Principales. En gras les variables ayant une contribution supérieure à la contribution moyenne.....122

Tableau 25 : Caractérisation des trois groupes de couples 'parcelle-année' vis à vis du développement végétatif et reproducteur, issus de la Classification Ascendante Hiérarchique suivant les valeurs des cinq variables utilisées pour l'analyse : le poids de bois de taille (PBT), la surface foliaire exposée (SFE), le poids de récolte (RE), le rapport entre la surface foliaire et le poids de récolte (SFE/RE) et la puissance (PUI). Les valeurs indiquées sont les suivantes : moyenne [minimale; maximale]. Les flèches indiquent que : l'ensemble des individus du groupe a des coordonnées positives (↗↗) sur les deux premières dimension de l'Analyse en Composantes Principale ou négatives (↘↘), seuls certains individus ont des coordonnées positives (↗) ou négatives (↘).....123

Tableau 26 : Coordonnées et contributions des quatre variables suivantes : indices de précocité de débourrement (P_iD), de floraison (P_iF), de véraison (P_iV) et de maturité (P_iM), pour les deux premières dimensions de l'Analyse en Composantes Principales. En gras, les variables ayant une contribution supérieure à la contribution moyenne.....128

Tableau 27 : Caractérisation des trois groupes de précocité, issus de la Classification Ascendante Hiérarchique, suivant les valeurs des cinq variables utilisées pour l'analyse : indices de précocité de débourrement (P_iD), de floraison (P_iF), de véraison (P_iV) et de maturité (P_iM). Les valeurs indiquées sont les suivantes : moyenne [minimale; maximale]. Les flèches indiquent que : l'ensemble des individus du groupe a des coordonnées positives (↗↗) sur les deux premières dimension de l'Analyse en Composantes Principale ou négatives (↘↘), seuls certains individus ont des coordonnées positives (↗) ou négatives (↘).....129

Tableau 28 : Correspondances entre les groupes et niveaux de contrainte hydrique, les valeurs des seuils de potentiels de base, les rapports isotopiques C13/C12 et la fraction d'eau du sol transpirable (FTSW) évaluée à partir d'un modèle de bilan hydrique, suivant Carbonneau (1998), Van Leeuwen et al. (2009) et Lebon et al. (2003).....132

Tableau 29 : Mise en relation des niveaux de contrainte hydrique évalués suivant le calcul des itinéraires hydriques et de ceux évalués suivant la mesure du rapport istopique C13/C12. CHYD1 : absence de contrainte hydrique, CHYD2 ; contrainte hydrique faible à modérée, CHYD3 : contrainte hydrique modérée à forte.....132

Tableau 30 : Identification des itinéraires de fonctionnement par combinaisons des trois ensembles de variables suivantes : celles caractérisant le développement végétatif et reproducteur (groupes DEV1, DEV2 et DEV3) : poids de bois de taille (PBT), surface foliaire exposée (SFE), poids de récolte (RE), rapport entre la surface foliaire exposée et le poids de récolte (SFE/RE) et la puissance (PUI); celles caractérisant la précocité de développement (groupes PRE1, PRE2 et PRE3) : indices de précocité de débourrement (P_iD), de floraison (P_iF), de véraison (P_iV) et de maturité (P_iM), les valeurs du rapport isotopique C13/C12 caractérisant la contrainte hydrique (groupes CHYD1 : absence de contrainte

hydrique, CHYD2 : contrainte hydrique faible à modérée et CHYD3 : contrainte hydrique modérée à forte). 135

Tableau 31 : Liste des descripteurs générés et utilisés par chaque jury expert en 2002 et 2005. * : termes ayant la même signification.....143

Tableau 32 : Evaluations sensorielles utilisées pour caractériser les types de 'produit raisin/vin' des quatorze parcelles d'étude.....143

Tableau 33 : Règles de décision agrégeant les partitions de chaque critère afin de définir un type de 'produit raisin/vin'.....144

Tableau 34 : Termes linguistiques correspondants à chaque partition d'un critère. Une partition correspond à un sous-ensemble flou.....144

Tableau 35 : Évaluation sur une échelle de 0 à 10 des critères 'Fruité', 'Corsé' et 'Tanins Secs' par le jury de professionnels pour les parcelles d'étude en 2002 et 2005.....145

Tableau 36 : Coefficient de corrélations de Pearson (P-value) – coefficient de détermination (R^2), entre les trois critères (pour vingt-quatre couples 'parcelle-année').....145

Tableau 37 : Pourcentages d'appartenance de chaque couple 'parcelle-année' à chaque type de 'produit raisin/vin' en 2002 et 2005. FCS : 'Fruité - Corsé - Tanins secs', FCF : 'Fruité – Corsé - Tanins Fondus', FLS : 'Fruité - Léger - Tanins Secs', FLF : 'Fruité - Léger - Tanins Fondus', VC : 'Végétal - Corsé', VL : 'Végétal - Léger.....146

Tableau 38 : Variations entre les pourcentages d'appartenance à chaque type de 'produit raisin/vin' en comparant 2005 à 2002. FCS : 'Fruité - Corsé avec - Tanins Secs', FCF : 'Fruité - Corsé - Tanins Fondus', FLS : 'Fruité Léger - Tanins Secs', FLF : 'Fruité Léger - Tanins Fondus', VC : 'Végétal - Corsé', VL : 'Végétal - Léger'.....147

Tableau 39 : Valeurs des coefficients de la PLSR pour chaque type du jury de professionnels (JP) et pour chaque descripteur du jury expert (JE). FCS : type 'Fruité – Corsé – Tanins Secs', FCF : type 'Fruité – Corsé – Tanins Fondus', FLS : type 'Fruité – Léger – Tanins Secs', FLF : type 'Fruité – Léger – Tanins Fondus', VC : type 'Végétal – Corsé', VL : type 'Végétal – Léger'.....149

Tableau 40 : Valeurs des VIP de la PLSR pour chaque type du jury de professionnels et descripteurs du jury expert. FCS : type 'Fruité – Corsé – Tanins Secs', FCF : type 'Fruité – Corsé – Tanins Fondus', FLS : type 'Fruité – Léger – Tanins Secs', FLF : type 'Fruité – Léger – Tanins Fondus', VC : type 'Végétal – Corsé', VL : type 'Végétal – Léger'. Les valeurs en gras sont supérieures à 0.8, selon Tenenhaus (2005) les variables sont alors considérées comme importantes pour la prédiction.....150

Tableau 41 : Croisement des itinéraires de fonctionnement identifiés et des types de 'produit raisin/vin'

FCS (plus 'Fruité – Corsé – Tanins Secs' et moins 'Végétal – Léger') et VL (plus 'Végétal – Léger' et moins 'Fruité – Corsé – Tanins Secs') des quatorze parcelles d'études. Seuls onze itinéraires de fonctionnement peuvent être caractérisés sensoriellement et uniquement dix-sept couples 'parcelle-année' ont une appartenance au type FCS ou VL bien identifiée.....154

Introduction générale

L'influence de la combinaison des facteurs du milieu et des pratiques - que ce soient les pratiques culturales à la vigne ou les pratiques œnologiques en cave - sur l'appréciation sensorielle du vin, est reconnue empiriquement depuis longtemps. Les caractéristiques sensorielles des vins, à la base de cette appréciation, par les producteurs et par les consommateurs, sont ainsi conditionnées par plusieurs facteurs. Les marchés internationaux sont de plus en plus concurrentiels et sont demandeurs de produits ayant des caractéristiques bien définies. Les changements climatiques ont un impact sur les conditions de production des raisins. Enfin, les ressources naturelles ou la santé humaine sont de plus en plus préservées. Ces facteurs entraînent une nécessaire évolution des actes techniques. Il devient essentiel de les optimiser, et notamment ceux qui correspondent aux pratiques culturales, pour garantir la durabilité de la production viticole.

L'optimisation des pratiques culturales de la vigne est conditionnée, d'une part, par les objectifs de production et, d'autre part, par les facteurs du milieu. Nous incluons dans le choix des pratiques culturales, celui du matériel végétal (cépage, clone et porte-greffe). Les viticulteurs sont amenés à intégrer un grand nombre de variables qui sont regroupées sous le terme de 'terroir'. L'Organisation Internationale de la Vigne et du Vin (OIV) a récemment défini le 'terroir' comme « un concept qui se réfère à un espace sur lequel se développe un savoir collectif des interactions entre un milieu physique et biologique identifiable et les pratiques vitivinicoles appliquées, qui confèrent des caractéristiques distinctives aux produits originaires de cet espace » (OIV 2010). Le lien au terroir se traduisant par une typicité revendiquée (Cadot et al. 2012), l'optimisation des pratiques culturales doit aussi respecter la dimension collective des vins d'appellations d'origine.

La définition du terme de 'terroir' viti-vinicole, par l'OIV, décrit un système complexe, car il prend en compte plusieurs facteurs et les interactions entre ceux-ci. Il est par conséquent difficile d'étudier le terroir sous toutes ses facettes à la fois (Morlat 2010). Des études visent à étudier les facteurs du milieu et leur impact sur le fonctionnement de la vigne (Choné 2001; Bodin et Morlat 2006; Morlat et Bodin 2006; Van Leeuwen et al. 2007; Burgos et al. 2008; Carey et al. 2009; Bonfante et al. 2011), les pratiques culturales sont alors fixées. D'autres travaux de recherche visent à étudier l'effet de ces dernières, sur le fonctionnement de la vigne, mais sur un même milieu (Morlat 1981; Koblet et al. 1994; Percival et al. 1994; Tesic et al. 2007; Reynolds et Heuvel 2009). Peu de travaux prennent en compte les interactions entre les facteurs du milieu et les pratiques culturales (Van Leeuwen et al. 2004; Barbeau et al. 2006). Appréhender le concept de terroir et évaluer l'effet de l'ensemble des facteurs qui influencent la qualité des produits est très difficile par des expérimentations sur des parcelles. Lorsque l'agronome ne peut plus se fonder uniquement sur l'expérimentation, des modèles peuvent toutefois l'aider (Meynard 1998).

Dans le cadre des études sur le terroir et la typicité, un modèle intégrant les facteurs du milieu, les pratiques culturales et le comportement de la vigne, à l'échelle parcellaire, est vivement attendu. Nous proposons de contribuer à sa construction. Il pourra constituer le support d'un outil d'aide à la décision permettant d'adapter les pratiques culturales en fonction des facteurs du milieu et du type de produit souhaité. Il pourra aussi permettre d'évaluer des scénarios prospectifs pour anticiper des adaptations.

Pour construire ce type de modèle, les recherches en agronomie viticole doivent adopter une démarche d'analyse systémique d'élaboration de la qualité du produit et du concept de terroir. Ce travail de thèse est une contribution à cet objectif. La question se pose alors de savoir comment modéliser le fonctionnement de la vigne afin d'optimiser les pratiques culturales et avoir une meilleure maîtrise du type de vin obtenu. Le concept d'itinéraire de fonctionnement, qui s'appuie sur la caractérisation des variables de fonctionnement de la vigne, peut répondre à cette question de recherche.

Ce manuscrit se structure en 3 chapitres :

Le **premier chapitre** présente les connaissances à la base d'une modélisation du système, de la construction de la problématique et de la démarche de recherche. Il aborde le concept d'itinéraire de fonctionnement que nous avons défini et sur lequel repose ce travail.

Le **second chapitre** développe la modélisation du fonctionnement de la vigne, en fonction des facteurs du milieu et des pratiques, en utilisant des systèmes d'inférence floue.

Le **troisième chapitre** présente la mise en relation des itinéraires de fonctionnement avec les types de produit.

Enfin, une **discussion générale,** s'appuyant sur l'ensemble des résultats, présente les apports et limites de ce travail de thèse ainsi que les perspectives.

Partie 1. Contexte de la thèse et démarche méthodologique

Partie1. Contexte de la thèse et démarche méthodologique

Chapitre1. Des milieux et des pratiques à l'origine des vins

1. Les pratiques culturales au cœur du système de production

Le rôle des pratiques culturales est primordial et doit être pris en compte dans les études liées à la caractérisation des terroirs. Les pratiques des viticulteurs, en interactions entre elles, et avec les facteurs du milieu, conditionnent le fonctionnement de la vigne (Jackson et Lombard 1993; Tesic et al. 2007; Reynolds et Heuvel 2009). En s'affranchissant des impacts des bio-agresseurs, le fonctionnement de la vigne influence les caractéristiques des raisins et par conséquent celles des vins (Carbonneau et al. 2007).

La vigne est une culture pérenne. Pour ce type de production, certaines pratiques culturales, qualifiées de pratiques fixes ou pérennes, sont choisies au moment de la plantation de la parcelle. Il s'agit pour la vigne de choisir notamment le matériel végétal (cépage, clone et porte-greffe) ou l'écartement entre les rangs et les ceps. D'autres pratiques sont fixées pour plusieurs années mais peuvent être modifiées, comme par exemple le mode d'entretien du sol ou le type de taille ; nous les qualifions de pratiques semi-pérennes. Des pratiques peuvent être adaptées au cours du millésime, selon le climat ou le niveau de rendement choisi par le viticulteur ; nous pouvons citer, par exemple, la date de taille, l'intensité de l'effeuillage, de l'ébourgeonnage ou de l'éclaircissage ; nous qualifions ces pratiques de pratiques correctives annuelles.

Une bonne adaptation des pratiques, pérennes et semi-pérennes, peut permettre de diminuer des effets indésirables des facteurs du milieu physique sur le fonctionnement de la vigne. Des pratiques mal adaptées peuvent, à l'inverse, amplifier une vigueur conférée par les facteurs du milieu déjà forte ou décaler d'autant plus la précocité d'une parcelle. Cela montre la nécessité de considérer, d'une manière conjointe, l'effet des facteurs du milieu et celui des pratiques culturales sur le fonctionnement de la vigne.

Parfois les pratiques pérennes, en association avec les facteurs du milieu, n'ont plus l'effet recherché sur le fonctionnement de la vigne ; celui-ci ne permet plus de produire le type de vin souhaité. Le vigneron est alors amené à appliquer un plus grand nombre de pratiques annuelles correctives pour diminuer voire annuler l'impact négatif des pratiques pérennes. Les pratiques fixes déjà en place sur un vignoble peuvent être mal adaptées, notamment le choix du porte-greffe (Goulet et Morlat 2010). Ainsi, dans le vignoble de la Sarthe, 72 % des parcelles ont un porte-greffe trop vigoureux car les facteurs du milieu induisent déjà une très forte vigueur. Les viticulteurs disposeraient donc d'une marge de manœuvre pour optimiser leurs pratiques pérennes. Si les pratiques fixes sont bien adaptées aux facteurs du milieu et aux objectifs de production, le nombre de pratiques correctives annuelles au cours du cycle végétatif est diminué. La diminution de pratiques correctives va dans le sens de la mise en

œuvre d'une viticulture durable (OIV 2004)

Dans le cadre d'une viticulture de terroir et de production de vins à indication géographique, un certain nombre de pratiques sont imposées par les cahiers des charges des Appellations d'Origine Contrôlée (AOC). En dehors des pratiques fixées par ces AOC, le viticulteur a la possibilité d'adapter un certain nombre d'autres pratiques. Par exemple, nous indiquons dans le tableau 1 les pratiques pérennes, semi-pérennes et annuelles fixées par un cahier des charges et celles que le viticulteur peut choisir. Nous nous appuyons sur l'exemple de deux AOC du Val de Loire, les AOC « Saumur » et « Cabernet de Saumur ». Les pratiques imposées visent à obtenir une qualité optimale de raisin et sont raisonnées indépendamment des facteurs du milieu. Les pratiques que le viticulteur doit choisir sont fortement raisonnées en fonction des facteurs du milieu. Ces pratiques ont de plus un fort impact sur le développement de la vigne et la qualité du raisin (Agut et al. 2005; Barbeau et al. 2006; Tesic et al. 2007).

Tableau 1 : Pratiques pérennes, semi-pérennes et annuelles imposées par la réglementation et le cahier des charges régissant les deux AOC « Saumur » et « Cabernet de Saumur » (décret n°2011-1360 du 24 octobre 2011, JORF du 27 octobre 2011) et celles que peut choisir le viticulteur.

	Pratiques fixées par les cahiers des charges des AOC	**Pratiques au libre choix du viticulteur**
Pratiques pérennes	- le cépage - le mode de conduite : densité minimale de plantation, écartement maximal entre les rangs et écartement minimal entre les ceps	- le porte-greffe
Pratiques semi-pérennes	- le type de taille - le couvert végétal des tournières - la charge maximale en raisins et le rendement par hectare	- le mode d'entretien du sol : gestion du couvert herbacé, fertilisation minérale et amendements organiques
Pratiques annuelles	- le nombre de bourgeons maximal laissés à la taille - le rapport minimal entre la hauteur de feuillage et l'écartement entre les rangs, qui conditionne la hauteur minimale du rognage - l'interdiction d'irriguer - la richesse minimale en sucre du raisin qui détermine la date de vendange. - le début possible de la vendange (suivant le ban des vendanges)	- la date de taille - l'éclaircissage - l'effeuillage - le rognage - l'ébourgeonnage - la protection phytosanitaire

Le viticulteur adapte donc ces pratiques en fonction des facteurs du milieu mais aussi en fonction du type de produit qu'il souhaite élaborer. Certaines pratiques lui sont imposées. Il dispose toutefois d'une certaine marge de manœuvre pour d'autres pratiques qu'il adapte alors

suivant la représentation conceptuelle qu'il a du type de vin qu'il souhaite produire (Cadot et al. 2011).

La construction de la qualité du produit est représentée graphiquement sur la figure 1. Nous prenons en compte, d'une part, des facteurs permanents à l'échelle de la parcelle et du cycle végétatif et reproducteur annuel de la vigne. Ceux-ci regroupent les facteurs du milieu physique, qui sont stables et qui déterminent des types de fonctionnement (Morlat et al. 2001; Carey et al. 2008), les pratiques culturales pérennes ou semi-pérennes et quelques pratiques annuelles mises en œuvre avant le démarrage du cycle végétatif comme la date de taille. D'autre part, associés aux précédents, les facteurs non permanents influent sur le fonctionnement de la vigne durant son cycle végétatif (climat annuel et pratiques mises en œuvre au cours du cycle végétatif). L'ensemble conditionne la qualité du raisin obtenu et, par voie de conséquence, celle du vin. Le viticulteur peut, tout d'abord, adapter les pratiques culturales pérennes suivant la connaissance empirique qu'il a des facteurs du milieu permanents et non permanents et des interactions avec les pratiques mises en œuvre. Puis, il peut adapter les pratiques annuelles. Enfin suivant la composition du raisin obtenu et son objectif de production, il peut mettre en œuvre des pratiques œnologiques correctives en cave. Suivant le type de vin réellement obtenu, le vigneron peut être amené à reconsidérer son objectif de production et l'adaptation des différentes pratiques.

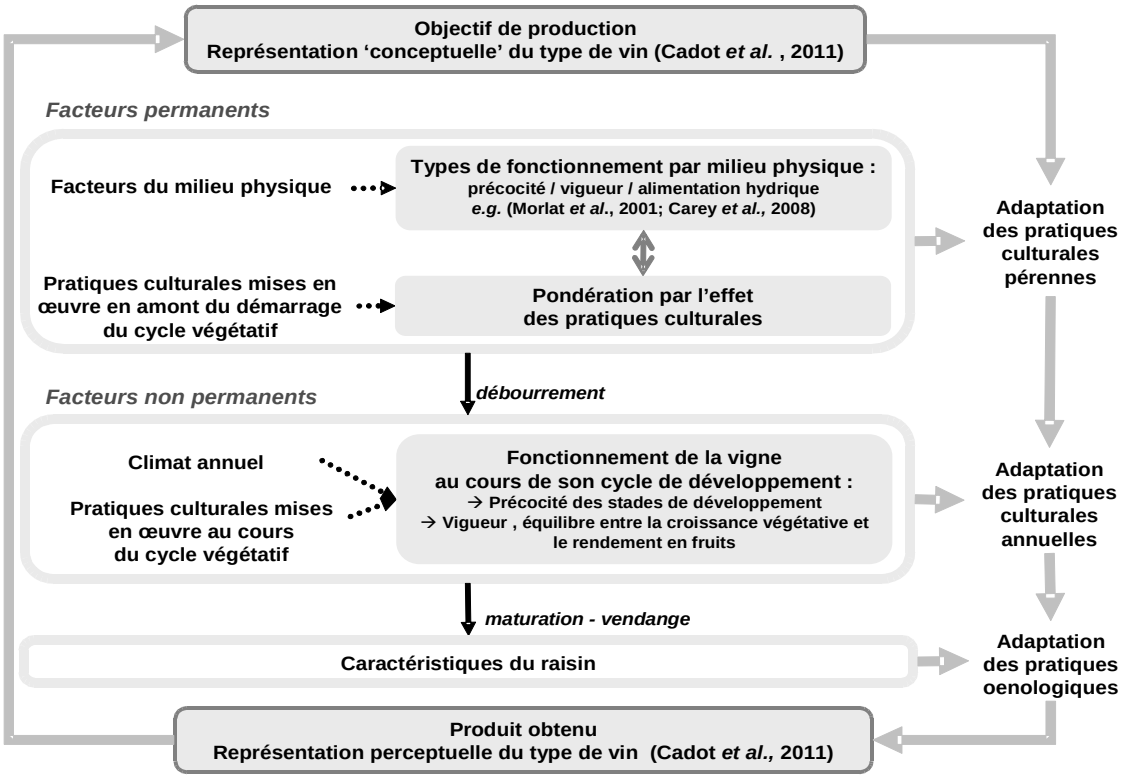


Figure 1 : Représentation de la construction de la qualité du raisin et du vin.

2. Des pratiques culturales pour un objectif de production défini

Le vigneron adapte ses pratiques culturales aux facteurs du milieu suivant son objectif de production. Ce dernier correspond à une représentation conceptuelle qu'il a du type de vin qu'il souhaite produire (Cadot et al. 2011) (Figure 1). Pour adapter ses pratiques, il se base sur l'observation du développement végétatif et reproducteur de sa vigne et sur des critères d'évaluation simples de la qualité du raisin, comme une teneur en sucre et un niveau d'acidité ou un niveau de rendement. Toutefois, de nombreux mécanismes physiologiques et composés de la baie interviennent dans l'élaboration de la qualité du raisin et par conséquent de celle du vin (Ribéreau-Gayon et al. 2004a; Ribéreau-Gayon et al. 2004b). Au sein d'une AOC, lorsque le vin produit par le viticulteur est évalué par un groupe de professionnels, la représentation conceptuelle qu'il a de son type de vin ne correspond pas toujours à la représentation perceptuelle du vin qu'il produira réellement (Cadot et al. 2012). Il est nécessaire de pouvoir évaluer une qualité globale du produit. Pour cela, il est important d'arriver à définir une typologie des vins. Cette typologie peut se raisonner à plusieurs niveaux :

– Au niveau des catégories de produits. Prenons l'exemple de parcelles existantes, plantées avec le cépage Cabernet franc, en Anjou (région viticole au Sud d'Angers). Certaines d'entre elles sont censées produire des vins effervescents (AOC « Crémant de Loire »), des vins rosés (AOC « Cabernet d'Anjou », AOC « Rosé d'Anjou » ou AOC « Rosé de Loire ») et des vins rouges (AOC « Anjou » ou AOC « Anjou-Villages »). Le viticulteur choisit le type de vin qu'il souhaite produire sur ces parcelles. Ce type conditionnant les pratiques qu'il met en œuvre.

– Au niveau des types au sein de ces catégories. Nous pouvons citer les six types identifiés par Deloire et al. (2005) dans la catégorie des vins rouges : allant d'un vin aux 'caractéristiques herbacées, dilué avec une forte acidité', jusqu'à un vin 'tannique, dur, astringent et avec un degré alcoolique très élevé'. Nous pouvons aussi citer la sélection 'vin corsé – vin léger' proposé par l'Institut Rhodanien (2004).

Dans le cadre des études sur le terroir et la typicité, nous pouvons alors nous demander à quel niveau il faut se situer. Nous parlerons dans nos travaux de type de 'produit raisin/vin' que nous définissons ci-après. Un type correspond à une combinaison de critères résumant l'ensemble des traits caractéristiques d'un groupe ou d'une famille de produits 'raisin/vin'. L'appartenance de raisins à un même type implique les mêmes ajustements de pratiques culturales en lien avec les caractéristiques des facteurs du milieu, le même niveau d'adaptation à une catégorie de vin donnée et le même itinéraire de vinification. Lorsque l'un de ces éléments change de façon significative, le type change.

3. Une évolution des études terroir

Plusieurs approches, plus ou moins complètes, ont été adoptées dans le cadre des études des terroirs viticoles. Une synthèse en est proposée par (Vaudour 2003).

La majorité de ces travaux caractérisent les facteurs du milieu physique (sol, sous-sol, environnement paysager).

Morlat et al. (2001) définissent l'Unité Terroir de Base (UTB) comme la plus petite surface de vignoble utilisable pour raisonner les pratiques culturales et dans laquelle la réponse de la vigne est reproductible à travers le vin. Il s'agit d'une entité de fonctionnement unitaire au sein du système viticole. Il faut toutefois noter que plusieurs UTB peuvent être présentes sur une même parcelle de vigne. Selon les cas, le viticulteur peut alors adapter ses pratiques culturales à l'échelle intra-parcellaire (comme le choix du porte-greffe). Les travaux menés en viticulture de précision montrent l'intérêt d'une gestion intra-parcellaire (Bramley et Hamilton 2007).

L'UTB intègre les trois composantes du milieu physique naturel : le substrat géologique, le sol et l'environnement paysager. Les UTB peuvent être étudiées selon un modèle décliné pour chaque matériau géologique présent dans un vignoble et basé sur la profondeur du sol. Les milieux 'Roche', correspondent à des sols peu profonds et souvent très caillouteux, la roche-mère est présente à moins de soixante-dix centimètres de profondeur. Les milieux 'Altération', correspondent à des sols moyennement profonds (soixante-dix à cent vingt centimètres). Enfin, les milieux 'Altérite', correspondent à des sols profonds (substrat au-delà de cent vingt centimètres de profondeur), peu ou pas caillouteux, souvent argileux. Bodin et Morlat (2006) ont montré des différences entre les milieux 'Roche' et 'Altérite' concernant la précocité et la vigueur. Les milieux 'Roche' sont plus précoces et sont sensiblement moins vigoureux que les milieux 'Altérite'. Ils ont aussi montré des différences concernant l'alimentation hydrique. Les milieux 'Roche' induisent une contrainte hydrique plus forte que les milieux 'Altérite'. Ces auteurs relèvent toutefois, que l'alimentation hydrique varie aussi suivant le type de roche-mère. Ce modèle de terrain rejoint le constat de Coipel et al. (2006) qui remarquent que l'effet 'terroir' des facteurs du milieu est plus lié à la profondeur du sol qu'au type de sol lui-même. Il faut toutefois préciser que ce modèle de terrain ne peut pas s'appliquer dans le cas des sols de formations superficielles qui ne sont pas issus d'une dégradation de la roche-mère (Vaudour et al. 2005).

Carey et al. (2009) y intègrent le climat et définissent l'Unité de Terroir Naturelle comme une unité du paysage caractérisée par une relative homogénéité des facteurs géologiques, du sol, de la topographie et du climat.

(Carbonneau 1993) définit l'Unité de Terroir Viticole (UTV) comme la combinaison des UTB et des pratiques culturales. Toutefois il ne s'agit à l'heure actuellement que d'un concept, il n'y a pas d'étude qui propose une identification des UTV sur un territoire. Ce concept est

toutefois très intéressant et va dans le sens de la prise en compte des pratiques dans les études terroir.

L'OIV a récemment proposé une définition du terroir qui mentionne toutefois le rôle des interactions entre le milieu physique et les pratiques mises en œuvre par les viticulteurs. Peu d'études sur le terroir intègrent la dimension humaine et collective alors que pourtant ce sont les activités humaines qui révèlent, à travers la mise en œuvre des pratiques culturales et le produit, le potentiel d'un terroir (Bérard et Marchenay 2006). Les travaux récents de l'UE1117 Vigne et Vin de l'INRA ont confirmé l'intérêt de prendre en compte les pratiques des viticulteurs dans les études de terroirs (Barbeau et al. 2006; Thiollet-Scholtus et al. 2009; Cadot et al. 2011).

L'étude et la cartographie des UTB d'un vignoble sont aujourd'hui assurées, au niveau angevin, par la « Cellule Terroirs Viticoles ». Pour le moment, la méthode utilisée ne prend pas en compte le rôle des pratiques culturales. La démarche de modélisation prévue dans cette thèse apportera des éléments pour intégrer l'effet des pratiques dans les études de terroirs.

4. Une démarche de modélisation systémique à mettre en œuvre

Le fonctionnement de la vigne peut être estimé au cours de son cycle végétatif par différentes mesures. Par exemple, de nombreuses méthodes, directes ou indirectes, destructives ou non, ont été développées pour quantifier le niveau de développement végétatif (Tregoat et al. 2001) : l'utilisation de différentes types de capteurs comme le NDVI est une technique largement répandue en viticulture de précision (Goutouly et al. 2006; Homayouni et al. 2008), la mesure de la surface foliaire ou du poids de bois de taille (Carbonneau et al. 2007) et des évaluations expertes (Bodin 2003; Carey et al. 2007). La précocité du cycle de développement peut être directement observée sur les parcelles et estimée à partir d'indices qui combinent les dates des stades phénologiques de la vigne (Barbeau et al. 1998).

Des mesures existent donc et permettent de porter un diagnostic sur une situation. Elles sont intégrées dans de nombreux dispositifs de recherche pour évaluer l'effet des facteurs du terroir, mais, elles ne permettent pas d'avoir une estimation *a priori* pour faciliter le choix des pratiques pérennes car elles sont uniquement disponibles durant le cycle végétatif. Pour palier à ce problème, des modèles peuvent être construits pour estimer le niveau de vigueur et la précocité d'une parcelle.

Les recherches en viticulture ont consisté, le plus souvent, à quantifier soit l'impact des facteurs du sol, soit du climat ou bien celui d'une pratique culturale sur la composition du raisin, les autres variables étant fixées. Dans ces conditions, il est difficile d'établir une hiérarchie et d'évaluer les interactions entre variables. Pourtant, pour mieux comprendre et gérer les liens entre les facteurs du milieu, les pratiques culturales et les caractéristiques des raisins et des vins, il convient de raisonner de manière systémique en considérant notamment les interactions

des pratiques entre elles et avec le milieu (Meynard 2008). Une approche système de ce type peut alors bénéficier avantageusement des apports de la modélisation.

Il faut toutefois bien distinguer, avant tout, le modèle - objet conceptuel composé d'hypothèses, de principes, de relations - des outils d'aide à la décision, demandés par les professionnels de la filière viti-vinicole, qui eux intègrent la notion d'usage (Jeuffroy et al. 2008). Les deux, modèles et outils, sont construits à partir d'agrégation de variables (Girardin et al. 1999). Celles-ci, prises en compte dans un modèle, ainsi que le niveau de détail, doivent être déterminés en fonction de l'usage prévu du modèle. Dans le cas d'un modèle qui sera utilisé comme support d'un outil d'aide à la décision, les variables d'entrée doivent être facilement accessibles en situation réelle, ce qui amène à simplifier le processus de modélisation (Cros et al. 2003). Il faut toutefois remarquer que l'accroissement du niveau de précision n'améliore pas nécessairement les prédictions du modèle car cela accroît simultanément les incertitudes (Sinclair et Seligman 1996).

De plus, pour être adaptés à des objectifs d'aide à la décision, les modèles conçus dans l'objectif de représenter et rassembler des connaissances sur le fonctionnement des systèmes doivent être couplés à un modèle qui représente le processus décisionnel (de Turckheim et al. 2009). La conception d'un modèle support à un outil d'aide à la décision doit en effet, au final, combiner plusieurs sous-modèles prenant en compte le système biophysique, les pratiques culturales, les coûts économiques et les processus décisionnels (Loyce et al. 2002; Le Gal et al. 2009). Ce couplage peut parfois être complexe étant donné les formalismes adoptés pour représenter le sous-système biophysique. Le choix du type de formalisme, pour agréger les variables, est donc très important. Le Gal et al. (2009) proposent une représentation du système de production sous forme de trois sous-systèmes : un sous-système décisionnel, un sous-système technique et un sous-système biophysique. Cette représentation, adaptée au système de production viticole, est montrée figure 2.

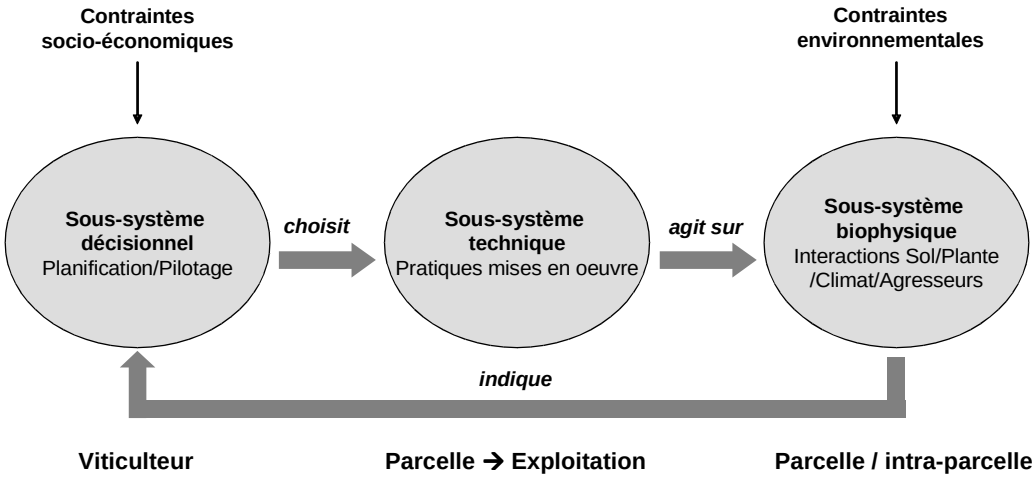


Figure 2 : Représentation schématique des relations entre les trois sous-systèmes constitutifs du système de production viticole (Le Gal et al., 2009, modifié).

Notre démarche vise à se positionner à l'interface entre les sous-systèmes technique et biophysique. Nous ne focalisons pas uniquement nos travaux sur le sous-système biophysique en construisant un modèle de simulation du fonctionnement de la vigne de type mécaniste.

Des travaux ont consisté à prédire la qualité du produit, suivant le fonctionnement de la vigne, en proposant le calcul d'indices. Nous pouvons citer les travaux de (Smart et Robinson 1991; Gray et al. 1997; Martinez de Toda et al. 2007). Ces indices prennent directement en compte des observations du fonctionnement de la vigne réalisées sur les parcelles. D'autres indices permettent de prédire le fonctionnement de la vigne en fonction des facteurs du milieu mais ne prennent pas en compte les pratiques culturales (Morlat et al. 2001).

Des modèles, intégrant l'ensemble des processus impliqués dans la détermination de la croissance des fruits et leur composition, et reproduisant la réponse de la plante au climat et aux pratiques culturales, existent pour des cultures pérennes ou annuelles, cependant ils doivent encore être adaptés pour la vigne (Dai et al. 2010). Ces auteurs ont réalisé une synthèse des approches de modélisation existantes pour comprendre les flux d'eau et de carbone au cours de la croissance de la baie et expliquer la composition de celle-ci. Ils notent que, pour la vigne, de nombreux modèles se concentrent sur la croissance du rameau (Lebon et al. 2004; Pallas et al. 2008), la structure de la végétation (Louarn et al. 2008), la réponse au type de taille (Orlandini et al. 2006), le bilan hydrique (Lebon et al. 2003; Pellegrino et al. 2006; Celette et al. 2010) ou l'accumulation et l'allocation de matière sèche à l'échelle de la plante (Gutierrez et al. 1985; Vivin et al. 2002; Poni et al. 2006). Des travaux visent aussi à prédire la maturation des baies (Fernandez Martinez et al. 2012; Sadras et Petrie 2012).

Un modèle de simulation du fonctionnement global est disponible pour la vigne, il s'agit de l'adaptation du modèle de culture STICS à la vigne faite par Garcia de Cortazar Atauri (2006). Cet auteur a notamment introduit un nouveau modèle de simulation de la date de débourrement : le modèle BRIN (Garcia de Cortazar Atauri et al. 2005). Ce modèle prend en compte les caractéristiques du cépage et la période de dormance. Cet auteur relève que les dates de débourrement sont bien simulées mais que les résultats sont très sensibles aux conditions climatiques des parcelles. Par conséquence, les conditions météorologiques doivent être connues avec précision, ce qui n'est pas toujours le cas si les stations météorologiques sont éloignées des parcelles étudiées. Un grand intérêt du modèle de culture STICS-Vigne est son application possible à l'échelle d'un pays, et la possibilité de comparer des vignobles. Son adaptation à la vigne a permis d'étudier l'impact du changement climatique à l'échelle nationale. Toutefois les valeurs des paramètres ne sont pas assez précises pour une utilisation à l'échelle locale, cela a été confirmé lors de son utilisation à l'échelle d'un réseau de parcelles expérimentales de l'INRA-UE1117 Vigne et Vin (Coulon et Barbeau 2007). Ce modèle ne prend ainsi pas en compte l'effet de certaines pratiques influençant fortement le développement de la vigne, comme le choix du porte-greffe, ce qui pourtant pourrait expliquer l'imprécision lors d'une utilisation sur un vignoble. Il permet de prédire une quantité de fruit produite et donc un

rendement. Toutefois, il ne simule pas les processus d'élaboration de la qualité, sauf la teneur en sucre. Ainsi, dans son état actuel, il ne peut pas être utilisé comme support à un outil d'aide à la décision à l'échelle de la parcelle pour adapter les pratiques. Si d'autres modèles ont été construits comme support d'aide à la décision, ils l'ont été dans le cas de problèmes très spécifiques, comme l'adaptation aux effets de la salinité (Walker et al. 2005); ou des pratiques de fertilisation (Nendel et Kersebaum 2004).

Nous aurions pu envisager de poursuivre le travail sur l'adaptation du modèle de culture STICS-Vigne pour une utilisation aux échelles fines, en ajustant les paramètres, et en intégrant de nouvelles variables et équations, pour mieux prédire la qualité du raisin. Parker et al. (2011) ont par exemple affiné la modélisation des stades phénologiques de la floraison et de la véraison. Nous aurions pu aussi nous appuyer sur les travaux de modélisation écophysiologiques cités par Dai et al. (2010).

Néanmoins, nous sommes convaincus qu'un modèle beaucoup plus simple peut répondre à notre objectif de modélisation du fonctionnement de la vigne pour une meilleure maîtrise du type de vin obtenu et une optimisation des pratiques culturales. C'est pour cela que nous n'avons pas exploité la voie des modèles mécanistes.

Des techniques d'intelligence artificielle peuvent être utilisées pour modéliser les systèmes incluant des facteurs du milieu (Chen et al. 2008). Les modèles construits, notamment à partir de la théorie des ensembles flous, sont capables de représenter des systèmes complexes, imprécis ou des relations approximatives qui sont difficiles à décrire dans le cadre de l'utilisation d'un modèle mathématique plus complexe.

La logique floue est utilisée comme une interface entre l'espace linguistique, c'est à dire le raisonnement humain, et l'espace du calcul numérique. Historiquement, les règles de décisions floues, agrégeant les variables, étaient obtenues uniquement par expertise. Toutefois la complexité de certains systèmes aboutissait à des erreurs importantes dans les résultats de simulation. Un nouveau mode de construction des systèmes flous peut être envisagé à partir de méthodes combinant l'expertise à des apprentissages automatiques à partir de bases de données (Guillaume et Magdalena 2006), un logiciel pouvant être utilisé (Guillaume et Charnomordic 2011). Ces méthodes nous semblent appropriées pour répondre à notre objectif.

5. Problématique et objectifs de la thèse

Il est difficile d'évaluer expérimentalement l'impact de l'ensemble des facteurs mis en jeu, sur la qualité des produits. Par conséquent, construire un modèle fonctionnel capable de traduire et expliciter fidèlement l'influence de l'ensemble des facteurs du milieu et des pratiques culturales, comme de leurs interactions, apparaît très ambitieux. Nous souhaitons cependant apporter notre contribution à la modélisation du système regroupant les facteurs du milieu, les pratiques culturales, le fonctionnement de la vigne et le type de produit obtenu, car il y a une demande de la filière viticole.

L’objectif de la thèse consiste à élaborer et appliquer une méthode de caractérisation systémique du fonctionnement de la vigne à partir des effets combinés du milieu et des pratiques culturales pour prévoir les types de vins. Elle doit contribuer au problème général de l'étude du terroir dans son sens large, à savoir en prenant en compte l'ensemble des facteurs du système impliqués dans ce concept : les facteurs du milieu, les facteurs humains et la qualité des produits.

Notre question de recherche peut être énoncée de la manière suivante :

Comment modéliser le fonctionnement de la vigne afin d'optimiser les pratiques culturales et d'avoir une meilleure maîtrise du type de vin obtenu ?

Chapitre2. Une méthode d'analyse systémique

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de l'Unité Mixte Technologique (UMT) VINITERA. L'UMT VINITERA regroupe des personnels de l'INRA UE1117 Vigne et Vin, des laboratoires GRAPPE et LARESS de l'Ecole Supérieure d'Agriculture, de l'Institut Français de la Vigne et du Vin et de l'association Cellule Terroirs Viticoles. Le programme mené de 2006 à 2011 était intitulé « Construction de la qualité des vins de terroir, des producteurs aux consommateurs », il avait pour thématique « La différenciation de la qualité par l'origine et les pratiques ». Le sujet de thèse s'est inscrit dans le cadre d'un des projets de l'UMT VINITERA qui visait à étudier le lien fonctionnel 'terroir-produits typiques' en mettant l'accent sur les facteurs environnementaux et les pratiques associées.

Il est nécessaire de prédire la qualité globale du produit. La modélisation peut permettre d'évaluer cette qualité globale. Dans cette thèse, nous posons l'hypothèse selon laquelle il est possible d'analyser et modéliser le fonctionnement de la vigne en fonction des effets couplés des facteurs du milieu et des pratiques pour relier son influence aux types de produit. Cette hypothèse est appliquée au vignoble de la moyenne vallée de la Loire.

En s'appuyant sur une approche systémique, la problématique de thèse est déclinée en trois sous-objectifs qui sont traités successivement dans chacun des trois chapitres de ce manuscrit.

L'objectif n°1 consiste à **représenter conceptuellement les relations entre les facteurs du milieu, les pratiques culturales et les caractéristiques du produit raisin/vin en sélectionnant les variables à prendre en compte**.

Comme nous l'avons évoqué précédemment, les multiples influences des facteurs du milieu et des pratiques culturales, y compris le choix du matériel végétal, sur les caractéristiques du raisin et du vin, sont observées empiriquement par les vignerons, mais n'ont jamais été abordées dans leur ensemble par la recherche. Une formalisation générale de ces influences et de leurs interactions, à l'échelle des terroirs viticoles, était tout d'abord nécessaire pour mieux caractériser le fonctionnement de la vigne et son impact sur le type de raisin et de vin.

Nous nous sommes appuyés, comme le proposent Zhu et al. (2007), sur la bibliographie et les connaissances acquises au sein de l'équipe INRA UE1117 Vigne et Vin.

Le fonctionnement de la vigne résultant de l'interaction entre les facteurs du milieu et les pratiques culturales se traduit par des niveaux de développement végétatif et reproducteur, de précocité de développement et des conditions d'alimentation en eau différents. Nous proposons un modèle conceptuel formalisant les relations entre les variables du système identifiées à partir de la bibliographie et des connaissances de l'équipe de recherche. Le système peut être représenté suivant le nouveau concept d'itinéraire de fonctionnement que nous définissons comme la combinaison logique et ordonnée des effets des facteurs du milieu et des pratiques

culturales sur le niveau de vigueur et de précocité de la vigne et les caractéristiques du produit final.

L'objectif n°2 vise a **évaluer le fonctionnement de la vigne suivant les effets conjoints des facteurs permanents du milieu et des pratiques pérennes** en construisant des variables composites pouvant être intégrées dans un outil d'aide à la décision. La construction des variables composites se déroule en deux étapes : la construction de variables caractérisant uniquement l'effet des facteurs du milieu sur le fonctionnement de la vigne puis, la construction de variables prenant en compte l'effet des pratiques culturales.

Dans la méthode proposée par Morlat et al. (2001) pour étudier les Unités Terroir de Base d'un vignoble, les niveaux ou potentiels de vigueur et précocité attribuables aux facteurs du milieu, ne sont pas directement mesurés mais estimés à partir d'algorithmes experts qui agrègent principalement des variables d'entrée dont les valeurs sont recueillies au cours des levés cartographiques. Les niveaux ou potentiels de vigueur et précocité obtenus sont appelés, dans notre modèle, variables composites, pour les distinguer des variables brutes d'entrée.

Les algorithmes de Morlat et al. (2001) sont basés sur des équations utilisant des variables discrètes, partitionnées en classes. Dans de nombreux cas, certains résultats doivent être réévalués par expertise à cause de la transition brusque entre les classes. Pour éviter ce problème, nous proposons, dans une première étape de travail, une nouvelle stratégie pour évaluer la vigueur et la précocité liées aux facteurs du milieu. La méthode envisagée remplace le modèle analytique de Morlat et al. (2001) par un modèle informatique qui met en œuvre une analyse de données et des systèmes d'inférence floue. Comme notre méthode a pour but d'apporter une plus-value à la méthode de Morlat et al. (2001) qui est bien documentée, une comparaison des résultats issus des deux méthodes est incluse dans la construction et le transfert du modèle informatique. La nouvelle méthode, utilisant les principes de la logique floue, permet d'obtenir une estimation continue de la vigueur et de la précocité conférées par les facteurs du sol, de la roche-mère et du paysage. Elle élimine les inconvénients des algorithmes experts de Morlat et al. (2001) dus à un découpage traditionnel en classes des variables. Un autre aspect concerne l'obtention des paramètres du modèle en combinant efficacement la connaissance experte et l'analyse de données. Ces paramètres peuvent facilement être adaptés à de nouvelles zones d'étude.

Ce travail doit apporter une réponse au problème de l'estimation de la vigueur et de la précocité conférées par les facteurs du milieu stables, qui est un pré-requis pour pouvoir adapter les pratiques culturales pérennes. Mais, cette étape est aussi nécessaire pour obtenir une estimation continue de la vigueur et de la précocité d'une parcelle, les variables construites étant par la suite agrégées avec celles caractérisant l'effet des pratiques culturales. Il est nécessaire d'avoir en amont une précision suffisante des variables d'entrée du modèle, afin de limiter les incertitudes au cours des étapes d'agrégation.

Dans une deuxième étape de travail, nous intégrons l'effet des pratiques culturales sur le fonctionnement de la vigne. Des interactions entre les variables caractérisant les facteurs du milieu et les pratiques culturales sont empiriquement observées par les viticulteurs, mais n'ont été que très peu étudiées sur le plan scientifique. Les recherches en viticulture consistent, le plus souvent, à quantifier l'impact d'une variable sur la croissance, la production et le fonctionnement de la vigne lorsque les autres sont fixées. Dans ces conditions, évaluer les interactions entre variables est difficile. Les rares études concernant les effets conjoints de certains facteurs du milieu et de pratiques culturales sur la croissance, la production et le fonctionnement de la vigne mettent en évidence la présence d'interactions, par exemple entre l'entretien du sol et l'alimentation hydrique (Lopes et al. 2011), l'entretien du sol et le porte-greffe (Barbeau et al. 2006; Lee et Steenwerth 2011) ou peuvent permettre de hiérarchiser l'effet des variables (van Leeuwen et al. 2004). Une formalisation des effets conjoints des facteurs du milieu et des pratiques culturales, incluant une hiérarchisation des variables impliquées et une évaluation de leurs interactions, est nécessaire pour mieux caractériser le fonctionnement de la vigne.

Des évaluations de vigueur de la vigne, faites à partir de notations visuelles de la surface foliaire sur des parcelles, sont utilisées comme données d'apprentissage pour évaluer les interactions entre facteurs. Les évaluations visuelles expertes sont moins précises que des mesures directes sur le végétal, mais elles sont moins coûteuses et peuvent être mises en œuvre sur une large zone. Nous avons choisi ces évaluations expertes comme données d'apprentissage afin de disposer d'un jeu de données provenant d'un grand nombre de parcelles. Nous utilisons des méthodes d'extraction de connaissance basées sur des apprentissages automatiques à partir de données obtenues sur une sélection de parcelles gérées par une cave coopérative et représentatives de la diversité des situations rencontrées dans le Saumurois, vignoble de la moyenne vallée de la Loire.

Nous avons appliqué cette méthodologie, permettant d'étudier les interactions entre les variables caractérisant les effets des facteurs du milieu et les pratiques pérennes, à la vigueur. La vigueur est une des variables majeures de fonctionnement de la vigne. Elle dépend des facteurs permanents du milieu, du porte-greffe et du mode d'entretien du sol. D'autres pratiques pérennes peuvent avoir une influence sur la vigueur comme la densité de plantation (Morlat et al. 1984; Murisier et Zufferey 2006) mais elles sont fixées par les décrets des AOC et devraient être déjà optimisées. Nous avons donc pris en compte les deux pratiques pour lesquelles le viticulteur dispose d'une marge de manœuvre : le choix du porte-greffe et du mode d'entretien du sol (Tableau 1, p. 32). Nous n'avons pas retenu la fertilisation en formulant l'hypothèse que les apports d'engrais des viticulteurs sont suffisants pour éviter l'apparition de carences minérales.

Nous avons choisi d'appliquer la méthode à la variable 'vigueur' car, pour une parcelle, celle-ci est moins sensible au millésime que la variable précocité, influencée aussi par le régime

thermique annuel (Carbonneau et al. 1992; Barbeau et al. 1998; Van Leeuwen et al. 2008). La précocité dépend également de la date de taille du viticulteur (Martin et Dunn 2000), laquelle peut changer d'une année à l'autre selon des contraintes socio-économiques fortes, comme l'organisation du travail dans l'exploitation, ou climatiques, comme le risque de gel, or nous ne prenons pas en compte, dans notre démarche, le système décisionnel (Figure 2, p. 37).

Nous proposons une méthode basée sur la construction de systèmes d'inférence floue. Elle prend en compte simultanément deux types d'incertitudes au cours de la modélisation du système étudié. Nous considérons, d'une part, l'incertitude sur les données d'entrée et, d'autre part, l'incertitude sur l'évaluation experte utilisée comme donnée d'apprentissage, c'est à dire dans notre cas, le niveau de vigueur observé.

L'objectif n°3 est d'**appliquer le modèle conceptuel d'itinéraire de fonctionnement et d'évaluer les relations avec une typologie caractérisant le produit raisin/vin**.

Dans le cadre d'une approche système, le fonctionnement de la vigne, que nous pouvons modéliser, doit pouvoir être relié à la qualité du raisin et du vin. La qualité du raisin et du vin est une qualité multicritères et les travaux développés dans cette thèse doivent poser les bases d'un futur outil d'aide à la décision pour les professionnels. Nous avons choisi de construire une typologie du produit à partir de l'expertise de ces derniers et de l'appliquer à des données expérimentales.

Les professionnels ont directement caractérisé le vin. Les vignerons et les techniciens sont amenés à orienter très tôt une parcelle vers un type de vin donné. Aussi nous avons donc choisi d'étudier directement les relations entre le fonctionnement de la vigne et les types de vins identifiés.

Nous avons appliqué la typologie aux données de quatorze parcelles de Cabernet franc situées dans les régions de Saumur, Bourgueil et Chinon pour deux années aux caractéristiques climatiques différentes. Nous avons pu relier des types de fonctionnement de la vigne à des types de produits.

La méthodologie, mise en œuvre dans le cadre de cette thèse, pour construire un modèle visant à prédire le fonctionnement de la vigne et relier celui-ci à une qualité globale du produit, permettra une avancée scientifique dans l'analyse des systèmes de culture. Elle évite d'avoir recours à des modèles de fonctionnement mécanistes qui simulent assez bien le niveau de rendement mais non la qualité globale des produits (Meynard 1998; Garcia de Cortazar Atauri 2006).

Chapitre3. Le concept d'itinéraire de fonctionnement de la vigne

Il est nécessaire de formaliser, à l'échelle des terroirs, l'influence des facteurs du milieu et des pratiques culturales ainsi que leurs interactions. Ceci afin de mieux caractériser le fonctionnement de la vigne et son impact sur le type de produit raisin/vin.

Le fonctionnement de la vigne résultant de l'interaction entre les facteurs du milieu et les pratiques culturales se traduit par des niveaux de précocité, de vigueur et des conditions d'alimentation en eau différents (Morlat et al. 2001). Nous proposons ici un modèle conceptuel, que nous appelons 'itinéraire de fonctionnement', qui formalise les relations entre ces variables.

1. Définition du concept

Nous définissons l'itinéraire de fonctionnement. A l'image de l'itinéraire technique, défini comme une combinaison logique et ordonnée des techniques mises en œuvre sur une parcelle en vue d'en obtenir une production (Sebillotte 1974), l'itinéraire de fonctionnement correspond à la combinaison des effets des facteurs du milieu physique, des pratiques culturales et du climat annuel sur le fonctionnement écophysiologique de la vigne. Le fonctionnement écophysiologique de la vigne est caractérisé suivant le niveau de vigueur et de précocité. L'itinéraire de fonctionnement détermine les caractéristiques du produit final. Il est défini tout d'abord par les effets de facteurs du milieu stables et des pratiques culturales pérennes ou semi-pérennes, sur le niveau de vigueur et de précocité, il s'agit d'une valeur 'origine' en termes écophysiologiques. Une même origine peut conduire à plusieurs itinéraires de fonctionnement, étant donné la variabilité du climat et des pratiques culturales annuelles. Un même type de produit peut être obtenu par différents itinéraires de fonctionnement.

2. La vigueur et la précocité : deux variables clés

Le fonctionnement écophysiologique de la vigne peut être décrit par deux variables principales, la vigueur et la précocité.

2.1. La vigueur

La vigueur correspondant avant tout au rythme et à l'intensité de la croissance du rameau (Carbonneau et al. 2007). Il faut être vigilant vis-à-vis de son interprétation à l'échelle de la parcelle : suivant l'âge ou le type de taille, une vigne peut avoir peu de rameaux très vigoureux ou un grand nombre de rameaux mais peu vigoureux (Dry et Loveys 1998). Le terme de vigueur de la vigne est couramment utilisé, à l'échelle de la parcelle, afin de caractériser de manière générale l'état de croissance de la vigne, que ce soit en pratique ou dans la littérature.

La vigueur de la vigne, que nous assimilons à son expression végétative, dépend des interactions entre le milieu physique, le matériel végétal et les pratiques culturales. Ces facteurs conditionnent les ressources radiatives, hydriques et minérales et leurs accès.

La vigueur exprimée de la vigne est conditionnée, en partie, par la vigueur attribuable aux

facteurs du milieu physique. Suivant la roche-mère, l'enracinement peut être plus ou moins profond, ce qui a un impact sur la vigueur. Plus la vigne a un système racinaire dense et profond plus elle a tendance à être vigoureuse (Dry et Loveys, 1998). La part de vigueur relative au milieu physique est liée à la distribution du système racinaire ; celle-ci dépend des caractéristiques du sol et de la roche-mère.

La vigueur liée aux facteurs du milieu peut être évaluée. Dans le cadre de la cartographie des Unités Terroir de Base d'un vignoble, Morlat et al. (2001) proposent le calcul d'une variable composite caractérisant le potentiel de vigueur relatif aux facteurs du milieu. Cette variable est appelée 'note de potentiel de vigueur du terroir' (NPVT). Ce potentiel de vigueur est calculé en fonction de la réserve en eau maximale du sol, de la pierrosité du sol et de la dureté de la roche-mère. La variable composite, prise en compte dans notre démarche de modélisation pour caractériser le niveau de vigueur, se base sur ces travaux.

Dans la méthode de Morlat et al. (2001), les facteurs chimiques du sol, qui peuvent aussi intervenir sur le potentiel de vigueur, n'ont pas été pris en compte pour estimer le potentiel de vigueur attribuable aux facteurs du milieu. Ces facteurs chimiques sont difficiles à cartographier car ils dépendent des caractéristiques du sol mais aussi de la fertilisation pratiquée par le vigneron.

Le niveau de vigueur lié aux facteurs du milieu peut être compensé, pour partie, par les pratiques du viticulteur.

Le matériel végétal est un des éléments importants de variation de la vigueur. Ainsi, le cépage Cabernet franc est jugé plus vigoureux que le Merlot (Havinal et al. 2008). Par ailleurs, le porte-greffe a une forte incidence sur la vigueur du greffon. Le niveau de vigueur conféré au cépage (le greffon) varie selon le type de porte-greffe (Minet et al. 2000). Il varie aussi suivant le type d'association cépage/porte-greffe, en raison d'interactions et de différences de compatibilités entre les génotypes (Ollat et al. 2003; Tandonnet et al. 2005, 2008; Koundouras et al. 2008).

Le choix du porte-greffe peut permettre de compenser le niveau de vigueur induit par le milieu. Les différences de vigueur conférées par les porte-greffes sont liées à des caractéristiques génétiques intrinsèques, mais s'expliquent aussi par des différences en termes de réaction à la contrainte hydrique. Le porte-greffe a, en effet, un impact sur la sensibilité à la contrainte hydrique, indépendamment de son effet sur la vigueur conférée au cépage (Marguerit et al. 2011). Certains porte-greffes sont plus efficaces pour extraire l'eau du sol. Goulet et Barbeau (2006) indiquent que la zone d'activité racinaire du porte-greffe Riparia est plus réduite que celle du SO4, pour une demande en eau jugée identique du système aérien, la zone d'activité racinaire s'assèche alors plus que celle du porte-greffe SO4. Toutefois, certains auteurs (Smart et al. 2006) signalent que les propriétés du sol semblent affecter plus significativement la distribution du système racinaire que le type de porte-greffe.

Comme nous venons de le voir, la vigueur dépend des conditions d'alimentation en eau

et de la distribution du système racinaire. Elles sont régies par l'effet des facteurs du milieu et du porte-greffe. Mais, elles dépendent aussi du mode d'entretien du sol (Barbeau et al. 2006).

L'enherbement du sol est souvent utilisé comme une alternative au désherbage chimique, pour diminuer les pollutions chimiques de l'environnement, et au travail du sol, pour lutter contre l'érosion. Les principales études ont montré les influences positives de l'enherbement sur les caractéristiques physiques et la protection des sols, la maîtrise du développement la vigne (vigueur et rendement), certaines attaques parasitaires et sur la qualité du raisin (Morlat 2010). Cette pratique s'inscrit totalement dans une démarche de protection de l'environnement et de viticulture durable.

Cependant, l'entretien du sol a un impact sur la disponibilité en eau du sol pour la vigne, celle-ci diminue lorsque la surface enherbée entre les rangs de vigne augmente (Tesic et al. 2007). Elle a aussi un impact sur la distribution du système racinaire, la concurrence de l'enherbement entraîne une plus grande croissance en profondeur de l'enracinement de la vigne et un plus fort développement sous le rang maintenu désherbé (Morlat et Jacquet 2003; Goulet et Barbeau 2006).

L'impact de l'enherbement vis-à-vis de la vigne dépend à la fois de la surface enherbée et des espèces utilisées (Delabays et al. 2006). Elles doivent être judicieusement adaptées aux propriétés du milieu. L'enherbement est en concurrence avec la vigne pour l'alimentation hydrique mais aussi pour l'alimentation azotée (Celette et al. 2009). L'azote est un élément minéral majeur pour la vigne. Il a un impact sur la composition du raisin et les caractéristiques sensorielles du vin. Un déficit en azote peut notamment entraîner des problèmes de fermentation (Bell et Henschke 2005).

La densité de plantation est une autre pratique qui a un impact sur la distribution du système racinaire de la vigne et donc un impact sur la vigueur. La densité de plantation est souvent fixée par les cahiers des charges des AOC qui régissent de nombreux vignobles français. Elle dépend, à la fois, de l'écartement entre les rangs et de l'espacement entre les ceps le long du rang. A titre d'exemple, des parcelles de Chenin conduites à la densité de 5000 ceps/ha ont une vigueur moindre (évaluée par un poids de bois de taille plus faible) que d'autres conduites à 2500 ceps/ha (Morlat et al. 1984). Murisier et Zufferey (2006) ont relevé également des poids de bois de taille par cep inférieurs pour des vignes de Chasselas à forte densité. En vignes à faible densité (2500 à 3000 ceps/ha), étant donné une absence de concurrence, la vigueur des ceps est maximale. D'après Carbonneau et al. (2007), lorsque la densité augmente, la concurrence entre ceps s'intensifie, ce qui entraîne une diminution de la croissance individuelle, jusqu'à une limite qui se situe vers 8000 ceps/ha.

D'autres pratiques comme le rognage, l'ébourgeonnage ou l'éclaircissage sont utilisées pour limiter le développement végétatif. Elles sont considérées comme des pratiques correctives et non comme des facteurs influençant directement la vigueur. Nous ne les prenons pas en compte dans la caractérisation des itinéraires de fonctionnement.

2.2. La précocité

La précocité de la vigne positionne dans le temps son développement et est donc aussi une variable écophysiologique importante. Elle est évaluée par les dates d'apparition des principaux stades phénologiques : débourrement, floraison et véraison. Suivant le niveau de précocité, la maturité optimale, pour un type de vin donné, va ainsi être atteinte plus ou moins tôt. En vignobles septentrionaux, une faible précocité peut ne pas permettre d'atteindre la maturité optimale, et néanmoins la récolte devra être déclenchée pour éviter un taux de pourriture trop important des raisins. La date de vendange permet de récolter suivant la précocité des parcelles, du raisin apte à produire le type de vin souhaité. Nous considérons donc la date de vendange comme une variable d'ajustement que va utiliser le vigneron.

Comme la vigueur, la précocité de la vigne dépend des interactions entre le matériel végétal, le milieu physique et les pratiques culturales. Le niveau de précocité peut être modifié par les pratiques culturales du viticulteur. Les pratiques culturales ont un plus faible impact sur la précocité, par rapport à leur impact sur la vigueur, car les facteurs du milieu jouent le plus grand rôle.

La précocité dépend, en grande partie du climat. La température de l'air a un fort impact sur la précocité (Pouget 1963; Riou 1994). L'environnement paysager d'une parcelle de vigne peut définir un climat local (mésoclimat) qui peut influencer la précocité, de même que la position géographique de la région.

Elle est également influencée par le pédoclimat. La teneur en eau est la variable majeure qui intervient sur les caractéristiques thermiques du sol. La précocité du débourrement est sensible à la température du sol au niveau de la zone racinaire (Morlat et Hardy 1986). Le comportement thermique des sols, réchauffement comme refroidissement, dépend de plusieurs facteurs dont la teneur en eau, la texture, la structure et les caractéristiques de surface du sol (Morlat et al. 2001). Le réchauffement du sol a un impact sur une mise en place plus précoce de la surface foliaire au printemps et en début d'été (Cellier et al. 1996; Asselin et al. 2001; Morlat et al. 2001). En l'absence d'autres facteurs limitants, il existe des différences de précocité suivant la texture du sol : un sol plus caillouteux entraînera, par un effet direct, un développement de la vigne plus précoce, en raison d'un moindre refroidissement durant la nuit (Trought et al. 2008) et certainement aussi par un effet indirect, lié à une teneur en eau plus faible (Morlat et al. 2001). L'impact non négligeable du pédoclimat peut amener à ce que les écarts de précocité varient au cours du temps car il peut exister au cours du cycle un rattrapage du retard de précocité au débourrement. Ainsi, dans le cas des sols sablo-graveleux des alluvions de la Loire, le réchauffement du sol, au début du printemps, au niveau de la zone racinaire, est moins rapide que pour d'autres sols, induisant un retard de précocité au débourrement, ensuite la chaleur accumulée étant mieux conservée, un rattrapage phénologique est alors observé à la floraison (Morlat et al. 1992).

Morlat et al. (2001) proposent le calcul d'une variable composite, appelée 'note de

potentiel de précocité du terroir' (NPPT), caractérisant le niveau de précocité induit par les facteurs du milieu. Le calcul de cette variable fait intervenir plusieurs variables : la profondeur du sol, la pierrosité du sol, la dureté de la roche-mère, l'humidité du sol à la capacité au champ, le drainage naturel du sol, la couleur de surface du sol, la profondeur de la zone de colonisation racinaire maximale, l'altitude du lieu, l'ouverture du paysage, l'inclinaison et l'orientation de la pente de la parcelle. Comme pour la vigueur, dans le cadre de cette étude, la variable composite construite se base sur ces travaux.

Pour certains auteurs, seule l'action de la température de l'air aurait une influence sur la vigne (Nendel 2009). Les auteurs qui relèvent la prédominance de l'effet de la température de l'air et donc du millésime proposent des modèles de simulation des stades phénologiques à partir de la température de l'air (Pouget 1963; Riou 1994; Garcia de Cortazar Atauri et al. 2009; Parker et al. 2011). Nous ne prenons pas en compte ces travaux dans notre démarche de modélisation, notre objectif consiste à caractériser préférentiellement l'impact des facteurs stables du milieu sur la précocité de chaque parcelle. Ces modèles de simulation des stades phénologiques peuvent permettre d'évaluer l'effet du climat de l'année sur la précocité du cycle et donc sur une précocité générale au cours d'un millésime pour l'ensemble des parcelles. Ces derniers et le modèle que nous proposons s'avèrent être complémentaires.

Concernant les pratiques culturales, la date de taille peut modifier sensiblement la part de précocité relative aux facteurs du milieu (Martin et Dunn 2000). La date de taille est choisie par les viticulteurs, notamment en fonction de la sensibilité au gel des parcelles. Celles qui sont les plus gélives seront taillées plus tard pour retarder le débourrement et limiter ainsi les dégâts sur les bourgeons. Le type de porte-greffe aurait une influence sur la précocité, toutefois très peu d'études montrent son impact net sur la précocité, nous pouvons uniquement citer les travaux de Barbeau et Blin (2011).

3. Le rôle de l'alimentation hydrique

De nombreux travaux attestent que la composition du raisin est fortement influencée par la contrainte hydrique que subit la vigne au cours de son cycle végétatif ; citons notamment les travaux de (Matthews et al. 1990; Koundouras et al. 1999; Chapman et al. 2005; Cadot et al. 2006; Chacon et al. 2009). Des niveaux de contraintes hydriques différents aboutissent à des types de vins différents (Deloire et al. 2005).

Dans le cas de cépages rouges, une alimentation hydrique induisant une contrainte hydrique modérée s'avère optimale pour la production d'une vendange de haute qualité (Van Leeuwen et al. 2009; Morlat 2010).

Une alimentation en eau non limitante entraîne une vigueur plus importante et une croissance végétative prolongée dans le temps. Les rendements sont aussi plus élevés mais les concentrations en sucres, acides organiques et composés phénoliques de la baie sont plus faibles. En effet, en raison d'une concurrence pour l'utilisation des assimilats entre grappes et

jeunes feuilles et du phénomène de dilution dans les baies, une absence de contrainte hydrique a une répercussion plutôt négative sur la qualité des vins (Champagnol 1984; Tesic et al. 2002; Cortell et al. 2005).

Une forte contrainte hydrique a un effet défavorable sur la photosynthèse et va diminuer la production d'assimilats avec notamment une réduction de l'accumulation des sucres et des anthocyanes dans la baie (Ojeda 1999). La synthèse de certains polyphénols est cependant augmentée chez les cépages rouges (Morlat et al. 1992; Cadot et al. 2006; Olle et al. 2011). De plus une contrainte hydrique très forte diminue la taille des baies ce qui, à cause d'une dilution plus faible, peut entraîner une plus forte concentration en certains composés, comme les composés phénoliques de la pellicule (Ojeda et al. 2002). Un accroissement de la teneur en composés phénoliques du raisin peut augmenter l'intensité de la couleur du vin et modifier sa structure (Chacon et al. 2009). Mais il faut remarquer que certains effets de la contrainte hydrique sur la composition du raisin, comme l'augmentation de la concentration en composés phénoliques de la pellicule, interviennent indépendamment d'une diminution de la taille des baies (Roby et al. 2004).

L'influence de la contrainte hydrique sur la vigne dépend du moment de son apparition. Une contrainte hydrique installée soit de manière modérée avant la véraison soit de manière forte après la véraison, affecte la composition des baies, alors qu'une contrainte hydrique modérée après véraison a un effet positif (Hardie et Considine 1976; Matthews et Anderson 1988; Morlat et al. 1992; Ojeda et al. 2002; Girona et al. 2009).

L'alimentation hydrique de la vigne dépend de la réserve maximale en eau du sol, de l'accessibilité de cette réserve en eau par les racines de la vigne, du climat, mais aussi des pratiques culturales et du matériel végétal. Les apports d'eau au sol et à la vigne sont liés à la pluviométrie et éventuellement à l'irrigation, tandis que les pertes concernent le ruissellement, l'évaporation directe du sol et la transpiration du couvert végétal.

Goulet et al. (2004) ont utilisé une méthode de calcul de la réserve en eau utile maximale du sol en fonction de la profondeur du sol, des humidités à la capacité au champ et au point de flétrissement, de la densité apparente et du pourcentage de terre fine basée sur l'équation de (Baize 2000).

L'alimentation hydrique peut être abordée grâce à un modèle de bilan hydrique (Riou et Lebon 2000). Celette et al. (2010) ont mis au point récemment un modèle de bilan hydrique intégrant la part d'eau consommée par l'enherbement et celle perdue par ruissellement.

Gary et al. (2005) indiquent une trajectoire optimale de contrainte hydrique au cours du cycle, pour assurer une vendange de qualité et un rendement satisfaisant. Deloire et al. (2005) affinent ce concept en proposant une trajectoire par style de vin.

4. Du modèle conceptuel au modèle opérationnel

Le modèle conceptuel, que nous appelons 'itinéraire de fonctionnement', est basé, tout d'abord, sur la caractérisation de deux variables, la vigueur et la précocité. Cette caractérisation est effectuée en fonction de facteurs permanents. Elle est indépendante des conditions climatiques du millésime. Les conditions d'alimentation hydrique du millésime entraînent ensuite une diversification des itinéraires de fonctionnement. Il s'agit d'une représentation simplifiée du système mais qui peut permettre de caractériser facilement le fonctionnement de la vigne et qui peut être suffisante pour lier celui-ci à un type de produit raisin/vin. On peut illustrer le concept d'itinéraire de fonctionnement par la figure 3. Une même parcelle peut présenter, suivant les conditions climatiques de l'année, plusieurs types d'itinéraires de fonctionnement conduisant à des types de raisin différents. Par ailleurs, un même type de raisin peut-être obtenu avec divers itinéraires de fonctionnement. Ainsi, pour une parcelle présentant une réserve utile maximale en eau importante, l'utilisation d'un enherbement très concurrentiel peut permettre d'obtenir une alimentation hydrique de la vigne similaire à celle d'une parcelle à plus faible réserve en eau conduite sans enherbement. Ce qui souligne à nouveau l'intérêt de considérer les combinaisons de facteurs. En conditions climatiques identiques, des combinaisons différentes entre facteurs du milieu et pratiques culturales pouvant conférer un même potentiel de vigueur ou de précocité. Divers itinéraires de fonctionnement peuvent ainsi aboutir à un même type de raisin et de vin. Une gestion fine des itinéraires de fonctionnement permettrait donc de produire des vins plus homogènes avec une meilleure maîtrise de leur qualité.

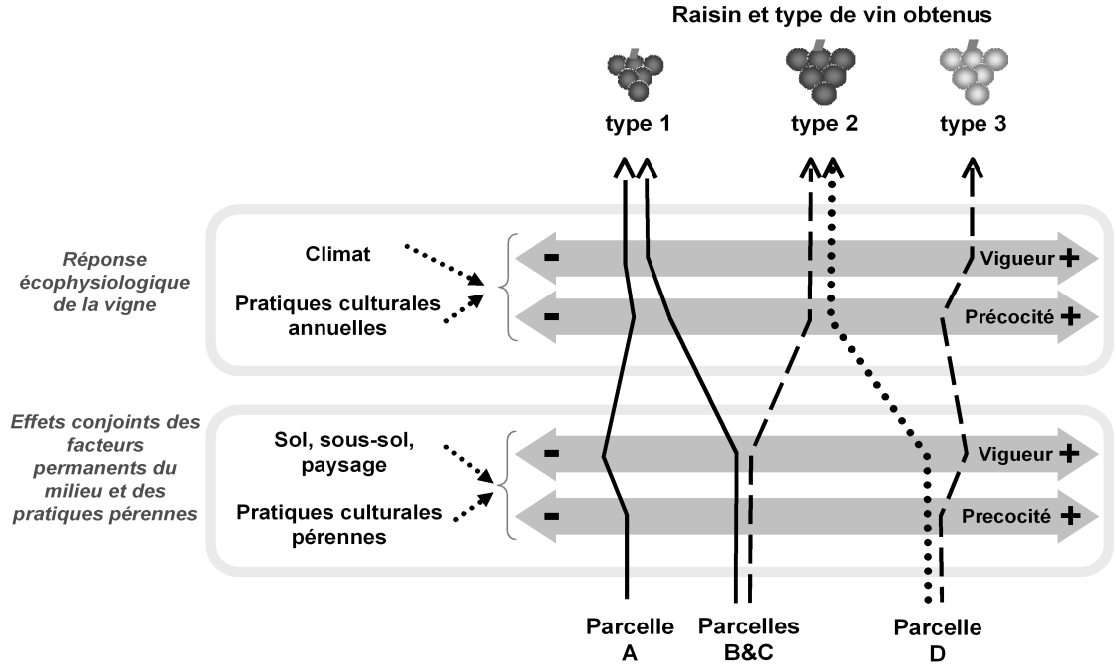


Figure 3 : Illustration du concept d'itinéraire de fonctionnement. Suivant les conditions climatiques de l'année, une même parcelle peut avoir des itinéraires de fonctionnement différents. Ces itinéraires de fonctionnement conduiront à des types de raisin différents. Un même type de raisin peut-être obtenu avec différents itinéraires de fonctionnement.

La démarche présentée, de type conceptuelle, peut s'assimiler à la première étape de construction d'un modèle. Il faut ensuite mettre en forme, c'est à dire notamment implémenter informatiquement, ce dernier, pour qu'il puisse être utilisable.

La démarche de modélisation à privilégier est alors de type qualitative. Dans la pratique, le conseiller viticole ou le chercheur caractérise le fonctionnement de la vigne relativement à une moyenne en utilisant des termes linguistiques qualitatifs. Par exemple, ils parlent de 'faible' ou 'forte' réserve en eau ou d'une température 'basse' ou 'élevée'. La modélisation, sous forme de systèmes experts, basée sur des règles de décision du type « si…alors… » qui agrègent ces termes linguistiques, semble de ce fait, la plus appropriée (Jackson 1998). Des travaux utilisant cette méthodologie ont été conduits en viticulture ou agro-alimentaire (Thiollet-Scholtus 2004; Paoli et al. 2005; Perrot et al. 2006, Grelier et al. 2007) et montrent tout l'intérêt de cette approche. Le principal intérêt de cette méthode, associée à de la logique floue, consiste en une représentation de mesures ou calculs, comme une réserve utile maximale en eau exprimée en millimètre, sous forme lexicale 'Faible' ou 'Forte' par exemple (Zadeh 1965). Nous développerons ce type d'approche dans le chapitre 2 en nous basant sur les travaux de Guillaume et Charnomordic (2010). Ces auteurs construisent des systèmes d'inférence floue à partir de données et d'expertises.

Le modèle conceptuel d'itinéraire de fonctionnement devient modèle opérationnel en plusieurs étapes de travail :

Nous construirons tout d'abord des variables permettant de caractériser la vigueur et la précocité d'une parcelle en fonction des facteurs du milieu permanents et des pratiques pérennes. Une première série de variables est construite pour caractériser uniquement les effets des facteurs du milieu permanents en choisissant de s'appuyer sur les travaux de Morlat et al. (2001) Ensuite, une deuxième série intègre l'effet des pratiques culturales pérennes associées à ces facteurs du milieu. Ces variables composites sont construites en utilisant des systèmes d'inférence floue. Leur calcul peut être complètement automatisé en utilisant un logiciel. Dans la suite des travaux, nous avons utilisé le logiciel Fispro (Guillaume et Charnomordic 2011).

Nous abordons ensuite le rôle des facteurs annuels. Les facteurs climatiques sont pris en compte. Le climat d'un millésime peut être évalué suivant son régime thermique et son régime hydrique. Le régime thermique induit une précocité, générale pour l'ensemble des parcelles d'un vignoble, plus ou moins forte. Nous considérons que le viticulteur dispose d'une variable d'ajustement : la date de vendange et nous ne prenons donc pas en compte le régime thermique dans le modèle opérationnel, considérant qu'il faut avant tout caractériser le niveau de précocité induit par les facteurs du milieu stables et des pratiques culturales. Le régime hydrique induit une contrainte hydrique plus ou moins forte. En dehors de la gestion de l'entretien du sol, du choix du matériel végétal et de la modification du rapport feuille/fruit, le viticulteur peut disposer d'une variable d'ajustement : l'irrigation, toutefois cette pratique est

fortement réglementée et le plus souvent interdite en France, notamment dans les vignobles AOC. C'est pour cela qu'il est nécessaire, en revanche, de prendre en compte le régime hydrique. Des modèles basés sur le calcul de bilans hydriques existent pour quantifier le régime hydrique (Riou et Lebon 2000; Lebon et al. 2003; Celette et al. 2010), nous utiliserons ces modèles.

L'impact du climat annuel sur une parcelle de vigne peut être anticipé en se basant sur l'identification d'années climatiques de référence, pour un vignoble. Nous avons proposé une méthode à ce sujet (Coulon et al. 2011).

Les différentes combinaisons entre les niveaux des variables : vigueur, précocité et contrainte hydrique définissent plusieurs itinéraires de fonctionnement (Figure 4). Ceux-ci sont ensuite reliés à des types de produit raisin/vin.

Des variables composites pour prédire les niveaux de vigueur et précocité d'une parcelle : Série 1 : en fonction des **facteurs du milieu permanents** Série 2 : en fonction des facteurs du milieu permanents et des **pratiques pérennes ou semi-pérennes** (prise en compte des interactions)	Facteurs climatiques : - Régime thermique : une variable d'ajustement = la date de vendange → Facteur maîtrisable, non pris en compte dans le modèle - Régime hydrique : une variable d'ajustement = l'irrigation, pratique non autorisée notamment dans les vignobles d'AOC →Facteur non maîtrisable, pris en compte dans le modèle Possibilité de se baser sur des années de référence

		Contrainte hydrique faible	Contrainte hydrique forte
Vigueur faible	Précocité faible	Parcelle A – Année A	Parcelle A – Année B
	Précocité forte		
Vigueur forte	Précocité faible		Parcelle B – Année A
	Précocité forte		Parcelle B – Année B

Un itinéraire de fonctionnement identifié ⟷ **Une qualité du produit raisin/vin définie**

Figure 4 : Démarche de caractérisation des itinéraires de fonctionnement. La démarche vise à caractériser l'impact des facteurs permanents (milieu physique et pratiques culturales pérennes ou semi-pérennes) sur les deux variables de fonctionnement : 'niveau de vigueur' et 'précocité' puis l'impact du climat de l'année sur la variable de fonctionnement 'contrainte hydrique'. Les différentes combinaisons des niveaux des variables de fonctionnement (deux niveaux pris en compte ici) définissent différents itinéraires de fonctionnement. Ces itinéraires de fonctionnement caractérisent le fonctionnement des parcelles.

Notre démarche étant avant tout méthodologique, nous élaborons la méthode permettant de construire les variables prédisant la vigueur et la précocité d'une parcelle, en fonction des facteurs du milieu permanents et des pratiques pérennes ou semi-pérennes, sur un vignoble de la moyenne Vallée de la Loire. Nous testerons ensuite le concept d'itinéraire de fonctionnement et son lien avec la qualité du produit raisin/vin, sur des parcelles d'étude.

Le modèle opérationnel, devrait pouvoir servir de support à un outil d'aide à la décision pour que les viticulteurs puissent optimiser le choix de leurs pratiques culturales en fonction de leurs objectifs de production et des caractéristiques des milieux de leurs parcelles. Il devrait aussi permettre d'évaluer des scénarios prospectifs.

La méthode développée dans cette thèse pourra donc ensuite être généralisée, pour obtenir un modèle opérationnel applicable à de nombreuses situations et notamment à d'autres productions.

Partie 2. Construction des principales variables de l'itinéraire de fonctionnement de la vigne

Partie2. Construction des principales variables de l'itinéraire de fonctionnement de la vigne

Le modèle conceptuel proposé dans le cadre de cette thèse prend en compte la caractérisation du fonctionnement de la vigne à partir des facteurs du milieu stables et des pratiques culturales pérennes ou semi-pérennes. Il s'agit ici de développer la méthode permettant de construire un modèle opérationnel pour prédire les principales variables de fonctionnement.

La première partie de ce chapitre (Partie 1.) présente la nouvelle approche pour estimer les niveaux de vigueur et précocité conférés par les facteurs du milieu. Elle est basée sur un modèle informatique composé de plusieurs systèmes d'inférence floue obtenus en retranscrivant les relations établies par les algorithmes de Morlat et al. (2001). L'adaptation nécessaire du mode de calcul est aussi présentée. Notre second objectif vise à évaluer les interactions avec les pratiques, ce travail est présenté dans la seconde partie de ce chapitre (Partie 2.). Nous ne présentons pas, dans ce chapitre, la caractérisation de la contrainte hydrique qui se base sur des méthodes et modèles existants et qui est directement mise en œuvre dans le Chapitre 3.

Chapitre1. Prédiction de la vigueur et de la précocité en fonction des facteurs du milieu

La prédiction de la vigueur et de la précocité est réalisée à partir de données issues de la caractérisation des facteurs du milieu et de l'expertise de pédologues et agronomes en utilisant des systèmes d'inférence floue.

Les relations entre les facteurs du milieu et le développement de la vigne (sa vigueur et sa précocité) connues à partir de la bibliographie et des travaux antérieurs de l'INRA UE1117 Vigne et Vin d'Angers constituent la base de connaissance sur laquelle notre méthode est construite. Nous utilisons les relations retranscrites dans les algorithmes développés par Morlat et al. (2001) pour évaluer les niveaux de vigueur et précocité attribuables aux facteurs du milieu. Ces auteurs ont validé les relations entre les variables et leur pondération sur un réseau en croisant la cartographie des terroirs viticoles avec des résultats issus de parcelles expérimentales et des résultats d'enquêtes auprès de viticulteurs (Morlat et Lebon 1992; Bodin et Morlat 2006; Morlat 2010). Nous présenterons tout d'abord les variables utilisées et la nouvelle stratégie de calcul ; puis nous aborderons les principes de la logique floue et des systèmes d'inférence floue, la construction des systèmes d'inférence floue qui remplacent les algorithmes précédents est ensuite détaillée. Cette construction combine l'analyse de données et la connaissance experte.

1. Variables et agrégation des variables

1.1. Vigueur

Le niveau de vigueur attribuable aux facteurs du milieu (VIG_MIL) est estimé à partir de trois variables d'entrée :

- la réserve en eau utile maximale du sol,
- le pourcentage de cailloux sur le profil du sol,
- et la dureté de la roche-mère.

La réserve en eau utile maximale du sol (RUM) est la variable qui influence le plus la vigueur : d'après Morlat et al. (2001), elle impacte le niveau de vigueur deux fois plus que le pourcentage de cailloux sur le profil du sol (CPS) et la dureté de la roche-mère (DRM). Pour caractériser un vignoble, RUM doit être estimée à une large échelle (l'ensemble du vignoble ou toute une région) tout en ayant une précision suffisante à celle de la parcelle pour permettre une bonne adaptation des pratiques. De nombreuses méthodes permettent de la mesurer toutefois, elles sont coûteuses et ne peuvent être utilisées que pour un nombre limité de points de sondage (Acevedo-Opazo et al. 2008). Une approche alternative peut être utilisée pour la calculer, en se basant, comme proposé par Goulet et al. (2004) sur l'équation citée dans (Baize 2000) (Équation 1). Cette équation utilise des données pédologiques obtenues au cours de la cartographie des terroirs viticoles. Les variables d'entrée de cette équation sont : le nombre d'horizons (h), l'épaisseur de chaque horizon (E), le pourcentage de terre fine (TF), l'humidité à la capacité au champ (HCC), l'humidité au point de flétrissement (HPF) et la densité apparente (DA). HCC, HPF et DA sont estimées à chaque point de sondage suivant la texture de chaque horizon du sol et les caractéristiques de la roche-mère comme proposé par Goulet et al. (2004).

$$RUM = \sum_{h=1}^{h} [(HCC - HPF) \times TF \times E \times DA]$$

Equation 1: Estimation de la réserve en eau utile maximale du sol (RUM, en mm) suivant l'équation citée dans Baize (2000). h : nombre d'horizons, HCC : humidité à la capacité au champ (%), HPF : humidité au point de flétrissement (%), TF : pourcentage de terre fine (%), E : épaisseur de l'horizon (dm), DA : densité apparente ($g.cm^{-3}$).

L'épaisseur de chaque horizon et le nombre d'horizons sont déterminés par le pédologue. L'épaisseur de l'horizon le plus profond peut facilement être connue quand la roche-mère est dure ou friable. Quand la roche-mère est très meuble et que le sol est très profond, RUM est alors calculée sur la profondeur racinaire. La profondeur racinaire est observée lors de l'ouverture de fosses pédologiques. Toutefois, il faut noter que même si la roche-mère est dure, certaines racines de vigne peuvent se développer à travers les fissures de celle-ci et contribuer significativement à l'alimentation hydrique.

La variable, pourcentage de cailloux sur le profil du sol, CPS, est directement observée sur chaque fosse pédologiques représentatives de la variabilité des types de sols rencontrés sur la zone d'étude et estimée grâce à une échelle exprimée en classes de pourcentage pour chaque horizon du sol, selon (Jamagne 1967). Une valeur moyenne pour le profil de chaque point de sondage à la tarrière est ensuite calculée en fonction de l'épaisseur de chacun.

La dureté de la roche-mère, DRM, est déterminée en fonction de la roche-mère et des caractéristiques de l'horizon de profondeur en suivant la nomenclature de Baize (2008), trois catégories sont prises en compte: dure (noté « 3 »), tendre (noté « 2 ») et meuble (noté « 1 ») (Tableau 2).

Tableau 2 : Catégories prises en compte pour évaluer la dureté de la roche-mère (DRM) déterminée, suivant la nomenclature pédologique (Baize et al., 2008) et le type de roche-mère.

Notation	Catégories	Nomenclature pédologique	Description	Exemples
3	Dure	R	Formation de roche-dure	Rhyolite
2	Tendre	Rt et C	Formation de roche tendre et horizon C, roche altérée	Craie, Schiste friable
1	Meuble	Rm et S	Roche déstructurée, horizon structural et formations d'alterite	Sable, Alluvions

Comme précisé par Piedallu et al. (2011), la texture de l'horizon, la profondeur du sol et le pourcentage de cailloux sont quantifiés visuellement, ce qui introduit de la subjectivité dans leur estimation. De plus, comme plusieurs observateurs peuvent intervenir dans l'acquisition des données, ceux-ci doivent veiller à utiliser le même référentiel, ce qui est théoriquement le cas avec la méthode utilisée. Les variables HCC, HPF, TF et DA sont mesurées au laboratoire ou sur le terrain, une source d'incertitude peut exister notamment pour HPF étant donné la déstructuration de l'échantillon du sol. Les données ont un caractère incertain.

La méthode de calcul de Morlat et al. (2001) se base sur un découpage en classe des variables quantitatives. Les algorithmes utilisés sont des équations établissant une relation linéaire entre les variables. Les valeurs proches des limites des classes obligent à réévaluer les résultats du calcul par expertise. Pour les vignobles de l'Anjou et du Saumurois, les limites de classes ont ainsi été fixées à cinquante et cent millimètres pour RUM et vingt et quarante pour cent pour CPS (Tableau 3 et Équation 2).

Tableau 3 : Eléments de calcul de la note de potentiel de vigueur (NPVT), selon Morlat et al. (2001).

Variables (v)	Coefficient de pondération (p)	Classes	Note (j)
Réservoir utilisable maximal - RUM	2	[0 à 50[mm	1
		[50 à 100[mm	2
		100 mm ou plus	3
Pierrosité du sol - CPS	1	> 40% de cailloux	1
		20 à 40% de cailloux	2
		<2 0% de cailloux	3
Dureté de la roche-mère - DRM	1	Roche dure	1
		Roche altérée	2
		Roche meuble	3

$$NPVT = \sum_{v=1}^{3} [(j_{v1} \times p_{v1}) + (j_{v2} \times p_{v2}) + (j_{v3} \times p_{v3})]$$

Equation 2 : Formule de calcul de la note de potentiel de vigueur du terroir (NPVT), selon Morlat et al. (2001).

1.2. Précocité

La précocité de la vigne liées aux facteurs du milieu (PRE_MIL) est influencée par :

- le niveau de vigueur attribué aux facteurs du milieu (VIG_MIL),
- le profil racinaire,
- le pédoclimat thermique
- le mésoclimat thermique.

Selon Morlat et al. (2001) la précocité conférée par les facteurs du milieu peut être estimée à partir de neuf variables d'entrée (Tableau 4 et Équation 3): le pourcentage de cailloux sur le profil du sol (CPS), la profondeur du sol (ES), la dureté de la roche-mère (DRM), l'humidité à la capacité au champ (HCC), le drainage naturel (DN), la couleur de surface du sol (CSS), la profondeur de densité racinaire maximale appelée aussi pic racinaire (PIC), l'altitude (ALT), l'ouverture du paysage (OP) et l'exposition (EXP).

La variable DN est estimée suivant l'échelle de Jamagne (Jamagne 1967).

La variable CSS est évaluée suivant le code couleur de Munsell (Munsell-Color-Company 2000).

La variable PIC est directement déterminée par expertise suivant le type de sol, lequel semble plus influent que le type de porte-greffe (Smart et al. 2006). En principe les second et troisième horizons ont une plus forte densité racinaire. Certains sols ont des horizons de surface sableux et des horizons très argileux en profondeur présentant alors deux pics de densité racinaire. Un premier pic racinaire exploite l'horizon sableux de surface qui va se réchauffer plus vite et va induire une plus forte précocité du débourrement. Un second pic racinaire exploite l'horizon argileux de profondeur qui a une capacité de rétention en eau supérieure à l'horizon de surface (Morlat 1993), ce qui induit un allongement du cycle végétatif, en raison d'un réchauffement plus tardif des racines. L'algorithme d'évaluation de la précocité évalue préférentiellement la précocité au débourrement. Les stades phénologiques suivants sont en effet plus directement liés à la température de l'air (Barbeau et al. 1998). Pour les types de sol présentant deux pics de densité racinaire, nous avons donc choisi d'attribuer la même valeur que pour un enracinement de surface.

La variable OP est déterminée suivant la méthode de (Jacquet et Morlat 1997).

La variable EXP dépend du pourcentage de la pente et de l'orientation de celle-ci.

Tableau 4 : Eléments de calcul de la note de potentiel de précocité (NPPT), selon Morlat et al. (2001).

Variables (v)	Coefficient de pondération (p)	Classes	Note (j)
Profondeur de sol (ES)	1	[0 à 40] cm	3
		]40 à 80] cm	2
		Plus de 80 cm	1
Pierrosité du profil (CPS)	1	> 40% de cailloux	3
		20 à 40% de cailloux	2
		<20% de cailloux	1
Dureté de la roche (DRM)	1	Roche dure (1 - 2 - 7)	3
		Roche altérée (3 - 4)	2
		Meuble (5 - 6)	1
Teneur volumique en eau à la capacité au champ sur 1m20 (HCC)	4	<15%	3
		[15 à 25%[	2
		25% ou plus	1
Drainage naturel d'après l'échelle de Jamagne (DN)	3	1 et 2: bon	3
		3: correct	2,5
		4: passable	2
		5 et 6: faible	1
Couleur de surface du sol (CSS)	1	sombre	3
		neutre	2
		claire	1
Zone de colonisation racinaire maximum (PIC)	3	[0 à 40[cm	3
		[40-60[	2
		60 cm ou plus	1
Altitude (ALT) et ouverture des paysages (OP)	3	Ouvert à basse altitude (< 50 m)	3
		Situations intermédiaires	2
		Thalweg ou ouvert à haute altitude (> 75 m)	1
Inclinaison des pentes et orientations (EXP)	3	> 10% sud	3
		[5 à 10%[sud	2,5
		< 5%	2
		[5 à 10%[nord	1,5
		< 10% nord	1

$$NPPT = \sum_{v=1}^{3} [(j_{v1} \times p_{v1}) + (j_{v2} \times p_{v2}) + ... + (j_{v9} \times p_{v9})]$$

Equation 3 : Formule de calcul de la note de potentiel de précocité du terroir (NPPT), selon Morlat et al. (2001).

1.3. Bases de données utilisées

Nous avons utilisé deux bases de donnés : une base pour élaborer la méthode correspondant aux données recueillies lors de la cartographie du vignoble du Saumurois (France) et une base pour la valider, obtenue sur un vignoble du Douro (Portugal) (Sources : Cellule Terroirs Viticoles).

Tableau 5 : Caractéristiques des bases de données utilisées pour élaborer et valider la méthode.

		Base de données de construction	**Base de données de validation**
Localisation du vignoble caractérisé		Saumurois, moyenne vallée de la Loire, France	Douro, Portugal
		6965 ha	677 ha
Nombre de points de sondage		9438	267
Nombre de points de références*		6478	221
Nombre de fosses pédologiques		114	17
Nombre d'Unités Terroir de Base		76	19
Gamme de variation des variables d'entrée continues	Réserve en eau utile maximale du sol (RUM)	[20 ; 370] mm	[51 ; 348] mm
	Pourcentage de cailloux sur le profil (CPS)	[0 ; 68]	[1 ; 80%] %
	Altitude (ALT)	[28 ; 108] m	[138 ; 331] m
	Humidité à la capacité au champ (HCC)	[3 ; 56] %	[6 ; 60] %

- *un point de référence correspond à la sélection d'un point d'un sondage parmi plusieurs qui sont proches et qui présentent les mêmes caractéristiques.*

Toutes les classes des variables discrètes sont présentes, pour les deux bases de données.

1.4. Nouvelle agrégation de variables

Nous utilisons les relations présentées dans les deux sous-sections ci-dessus.

La vigueur (VIG_MIL) est estimée suivant la réserve en eau maximale (RUM), le pourcentage de cailloux (CPS) et la dureté de la roche-mère (DRM), comme pour l'ancienne méthode de calcul.

Nous avons choisi une démarche différente pour l'estimation de la précocité (PRE_MIL). Nous estimons tout d'abord, le pédoclimat thermique (PED) et le mésoclimat thermique (MES). Ensuite PRE_MIL est estimée en fonction de quatre variables d'entrée : VIG_MIL, MES, PED et PIC.

Cette agrégation par sous-systèmes permet d'avoir une évaluation intermédiaire de MES et PED. Avoir ces variables intermédiaires, pour une zone d'étude, permet de mieux analyser la hiérarchisation des facteurs influant sur la précocité (par exemple une faible précocité étant donné tout d'abord un pédoclimat très froid). De plus, MES peut-être un

indicateur utile pour adapter la date de taille, les situations avec des valeurs faibles de mésoclimat peuvent être plus sensibles au gel printanier. Concernant l'impact de l'altitude sur la température et par conséquent sur la précocité, comme noté par plusieurs auteurs (Lebon 1993; Guyot 1999; Falcao et al. 2010; Morlat 2010), une altitude plus élevée induit une température de l'air plus faible et donc une précocité plus faible. Toutefois l'inverse peut-être observé, des inversions thermiques pouvant apparaître le long des pentes. Le cas des bas de pentes est pris en compte au même titre que les thalwegs par la variable 'topographie' (TOP), variable d'entrée de la variable MES.

Chaque variable composite est ainsi obtenue à partir de l'agrégation d'un nombre limité de variables d'entrée, ce qui facile l'analyse et la compréhension du fonctionnement du système global construit.

L'architecture proposée est représentée figure 5. Elle est sous-forme de différents sous-systèmes, correspondant chacun à un système d'inférence floue (SIF). Tout d'abord la vigueur (VIG_MIL), le mésoclimat thermique (MES), le pédoclimat thermique (PED) sont estimés suivant trois ou quatre variables d'entrée, puis la précocité (PRE_MIL) est estimée suivant VIG_MIL, MES, PED et PIC.

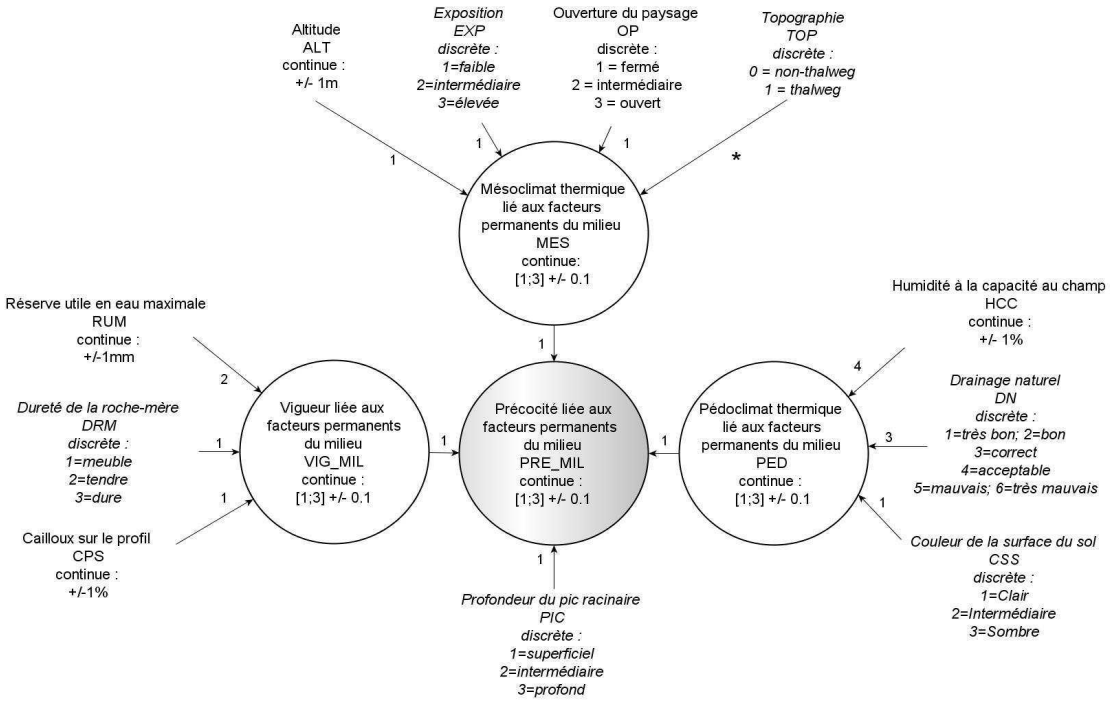


Figure 5 : Nouvelle architecture du système avec les variables d'entrée utilisées pour estimer les quatre variables de sortie : la vigueur de la vigne, le mésoclimat thermique, le pédoclimat thermique et la précocité du cycle végétatif de la vigne. Les caractéristiques des variables (continues ou discrètes) sont indiquées. Les variables d'entrée sont pondérées (les poids sont indiqués à côté des flèches) et agrégées en utilisant des systèmes d'inférence floue.

2. La méthode des systèmes d'inférence floue

Notre proposition de nouveau mode de calcul est basée sur les principes de la logique floue et des systèmes d'inférence floue (SIF) (Zadeh 1965; Nguyen 1996; Bouchon-Meunier et Marsala 2003). L'objectif de cette section est d'en présenter les principes et les bases théoriques.

Les systèmes d'inférence floue (SIF) sont l'application la plus connue du principe de la logique floue et de la théorie des ensembles flous (Guillaume et Charnomordic 2011). Ils permettent de manipuler des concepts linguistiques, par exemple 'Faible' ou 'Fort', implémentés en utilisant des ensembles flous. La logique floue est utilisée comme une interface entre l'espace linguistique, qui correspond au raisonnement humain, et l'espace du calcul numérique.

Un ensemble flou est défini par sa fonction d'appartenance. Un point x du domaine de définition de la variable considérée, appartient à un ensemble flou avec un degré d'appartenance, $0 \leq \mu_{(x)} \leq 1$. Si F est un ensemble flou qui correspond à une faible réserve en eau du sol, le degré d'appartenance d'une valeur donnée de la réserve en eau du sol, x, $\mu_{F(x)}$, peut être interprété comme le niveau auquel la réserve en eau du sol peut être considérée comme faible. Plusieurs ensembles flous, par exemple 'Faible', 'Moyen', 'Fort', peuvent être définis sur le même domaine de variation de la variable considérée, comme illustré figure 6.

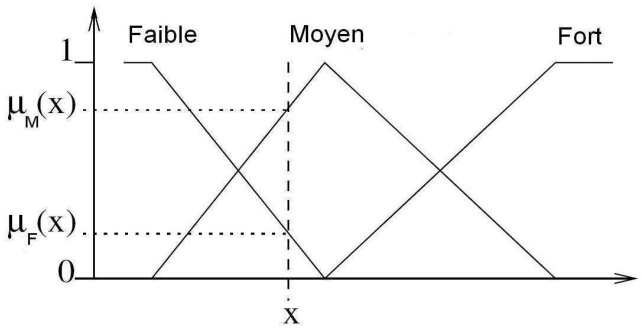


Figure 6 : Exemple de trois ensembles flous définis pour le même domaine de variation. 'x': un point du domaine de variation $\mu_F(x)$: le degré d'appartenance à l'ensemble flou 'Faible', $\mu_M(x)$: le degré d'appartenance à l'ensemble flou 'Moyen'.

Un point peut appartenir à plusieurs ensembles flous. Dans la figure 6, la valeur x appartient aux ensembles flous 'Faible' et 'Moyen' avec des degrés d'appartenance correspondants $\mu_{F(x)}$ et $\mu_{M(x)}$. Ceci permet de gérer la progressivité des phénomènes et les transitions douces entre les concepts. Cela permet aussi de gérer au mieux le caractère incertain des variables. Avec de tels ensembles, appelés partitions floues, un point peut appartenir, c'est à dire avoir un degré d'appartenance différent de 0, à au plus deux partitions floues. De plus, pour chaque point du domaine de définition de la variable, la somme des degrés d'appartenance de l'ensemble des partitions floues est normalisée à 1.

La première étape de construction d'un SIF correspond au partitionnement des variables.

Dans le cadre de notre étude, nous avons fixé le nombre de concepts linguistiques à deux, ce qui correspond à deux ensembles flous et par exemple aux termes 'Faible' et 'Fort', la zone floue traduisant les états intermédiaires.

Deux types de variables sont pris en compte : des variables continues et des variables discrètes. Le partitionnement flou des variables discrètes est possible dans notre cas car les valeurs discrètes sont ordonnées et ont un niveau de signification progressif (par exemple de « Meuble » à « Dur »). Les partitions sont définies par des paramètres ; dans le cas de deux partitions, deux paramètres sont à définir, C_1 et C_2 comme montré figure 7. Lorsqu'une valeur de la variable est inférieure au paramètre C_1, elle appartient au premier ensemble flou avec un degré d'appartenance égal à 1 et au second avec un degré d'appartenance de 0, c'est à dire qu'elle appartient totalement au premier ensemble flou et n'appartient pas au second; inversement pour les valeurs supérieure à C_2. Lorsqu'une valeur de la variable est comprise entre C_1 et C_2, elle appartient partiellement à chaque ensemble flou. Les paramètres des variables discrètes peuvent facilement être déterminés par expertise. Toutefois les paramètres des partitions des variables continues ne sont pas aussi faciles à déterminer, étant donné l'évolution progressive entre les valeurs. Pour choisir les paramètres, l'algorithme mono-dimensionnel *k-means* (MacQueen 1967) a été mis en œuvre sur les données d'entrée, indépendamment pour chaque variable, afin de construire deux groupes de points de sondage pédologique. Les valeurs des barycentres des deux groupes construits ont été prises comme valeurs des paramètres C_1 et C_2 (Figure 7).

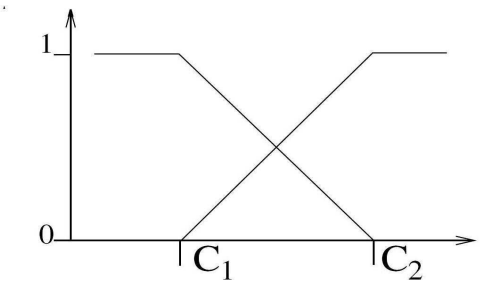


Figure 7 : Paramètres des partitions d'une variable en deux ensembles flous : C_1 et C_2.

Les ensembles flous sont utilisés dans les systèmes d'inférence floue pour construire des règles linguistiques, par exemple « Si la réserve en eau est faible et... alors... ». La plupart du temps plusieurs variables d'entrées sont impliquées dans les prémisses (“si...et...”) des règles. Les règles dans la base des règles de décision du SIF sont écrites ainsi :

Si x^1 *est* A^1_r *et* x^2 *est* A^2_r *… et* x^p *est* A^p_r *alors y est* C^r,

où A^k_r est l'ensemble flou de la variable d'entrée k pour la r-ième règle et C^r est la valeur de la conclusion de la règle. Les conclusions des règles de décision sont des valeurs numériques, cette formulation correspond à un SIF de type Sugeno (Takagi et Sugeno 1985).

Pour une valeur numérique de la réserve en eau, x, le degré d'activation de la règle de décision, w, qui signifie comment la règle de décision est activée pour un exemple, est donné par le degré d'appartenance de x dans l'ensemble flou 'Faible' $\mu_{F(x)}$.

Étant donné que les ensembles flous se chevauchent, une valeur donnée peut activer plusieurs règles de décision. Par conséquent, toutes ces règles de décision sont impliquées dans le système d'inférence et les conclusions des règles de décision sont agrégées pour donner la valeur finale. Pour un SIF de type Sugeno, l'agrégation est effectuée par une somme pondérée des conclusions des règles de décision, les poids correspondent aux degrés respectifs d'activation des règles.

La seconde étape de construction d'un SIF correspond au choix de la base des règles de décision. Pour chaque variable composite, les règles de décision ont facilement été extraites des précédents algorithmes de Morlat et al. (2001) et transposées au formalisme flou. L'ensemble des règles de décision couvre toutes les situations qui peuvent exister. Chaque conclusion des règles de décision est une valeur numérique comprise entre 1 et 3, prenant en compte les poids des différentes variables d'entrée.

Le logiciel Fispro 3.4[1] a été utilisé pour la construction des systèmes d'inférence floue.

3. Évaluation et validation du système construit

Les variables composites 'vigueur' et 'précocité' ont été bien documentées par (Morlat et al., 2001), nous avons dû valider le nouveau mode de construction en nous assurant que les relations entre les variables étaient bien respectées et l'utilisation facilitée. Le nouveau modèle a été construit en utilisant des données collectées sur la zone de Saumur en moyenne vallée de la Loire (France). L'accès et la facilité d'utilisation de la méthode ont été examinés en utilisant la même méthode sur un nouveau jeu de données collectées pour un vignoble du Douro (Portugal).

Les variables composites comme VIG_MIL, MES, PED et PRE_MIL ne peuvent être directement validées, à une large échelle, par comparaison avec des données précédemment mesurées sur des parcelles, parce qu'elles dépendent des pratiques culturales et des facteurs climatiques annuels. Par exemple, dans le cas de l'observation de la précocité, cette variable dépend aussi des facteurs annuels climatiques et de la date de taille (Martin et Dunn 2000). De la même manière, la vigueur dépend du type de porte-greffe (Ollat et al. 2003). Il est possible d'avoir une représentativité de la variabilité des facteurs du sol, du sous-sol et de l'environnement paysager sur une même zone d'étude. Toutefois il n'y aura pas exactement les mêmes conditions climatiques et les mêmes pratiques culturales qui seront mises en œuvre sur l'ensemble de la zone. Aussi, à la place d'une validation directe, nous avons minutieusement analysé le fonctionnement du système et comparé ses sorties avec celles de l'ancienne méthode de calcul corrigée par expertise. Nous avons aussi validé la généricité de la méthode.

1 http://www.inra.fr/internet/Departements/MIA/M/fispro/ site consulté le 15/01/2012

La transcription fidèle de l'influence des facteurs du milieu sur l'estimation de la vigueur et de la précocité devait donc être confirmée. L'impact de la valeur des paramètres en lien avec le niveau d'incertitude sur les variables d'entrée devait aussi être évalué. Pour répondre à ces deux points, il a été nécessaire d'étudier le fonctionnement du système. Nous avons choisi de conduire une analyse de sensibilité des paramètres flous et d'étudier la réponse de la variable composite aux fluctuations des variables d'entrée.

Étudier la sensibilité aux paramètres flous C_1 et C_2 (Figure 7) des variables continues revient à interpréter l'incertitude qui peut exister sur les données d'entrée. Pour cela nous analysons la fluctuation des valeurs des variables composites (variables de sorties) en fonction des valeurs des paramètres des variables d'entrée. Un jeu de données théorique avec les variables d'entrée a été construit pour tester, pour chaque variable composite, la sensibilité aux paramètres des variables d'entrée continues. Par exemple pour VIG_MIL, nous avons considéré toutes les combinaisons des valeurs suivantes : dix valeurs pour RUM et CPS et trois valeurs pour DRM. Pour les variables continues les dix valeurs correspondent à : une valeur inférieure à C_1, une valeur supérieure à C_2, C_1 et C_2 avec des degrés d'appartenance valant 1 et six valeurs équitablement distribuées entre C_1 et C_2 avec des degrés d'appartenance inférieurs à 1. Pour les variables discrètes nous avons pris en compte l'ensemble des valeurs que peut prendre chaque variable. Pour tester la sensibilité aux paramètres, les valeurs de sortie inférées, pour chaque variable composite, en utilisant les valeurs originales de C_1 et C_2, ont été comparées avec les valeurs inférées utilisant les valeurs des paramètres modifiées de plus ou moins 20%.

La variation de la valeur de sortie, en réponse aux fluctuations des variables d'entrée, a été étudiée pour vérifier le fonctionnement du système. La variation de la valeur de la variable de sortie a été analysée pour chaque variable d'entrée en fixant la valeur des autres variables d'entrée à une valeur donnée. Trois valeurs données, pour les variables d'entrée, ont été prises en compte : celle prédisant la plus faible valeur de la variable de sortie composite, la plus élevée et celle qui correspond à l'intersection des deux partitions floues ((C_1 + $C_{2)}$ / 2).

4. Partitionnement flou des variables

Comme présenté précédemment, le nombre de concepts linguistiques est fixé à deux pour chaque variable d'entrée, ce qui correspond aux termes 'Faible' et 'Fort'. En pratique les variables discrètes peuvent avoir plus de deux modalités. Par exemple, DRM, EXP, OP, CSS et PIC prennent trois valeurs différentes, la valeur intermédiaire peut être considérée à la fois comme 'Faible' et comme 'Forte' avec un degré d'appartenance de 0.5 pour chaque partition. La variable DN prend plusieurs valeurs entre 1 et 6, les valeurs sont complètement 'Faibles' pour des valeurs inférieures à 2 et complètement 'Fortes' pour des valeurs supérieures à 5 sur l'échelle de Jamagne (Jamagne 1967).

Toutes les variables du milieu ayant une influence sur la vigueur et la précocité sont

prises en compte, même si certaines variables sont homogènes sur la zone d'étude considérée, ceci afin d'assurer une généricité de la méthode. Ainsi, pour notre zone d'étude du Saumurois, la modalité 'Moyenne' de la variable CSS est sur-représentée (6278 points de référence), seulement deux points de sondage ont la modalité 'Forte' et 198 la modalité 'Faible'. Cette distribution déséquilibrée reflète l'homogénéité de la zone d'étude pour cette variable. D'autres zones peuvent avoir une distribution plus équilibrée de la couleur de surface du sol.

Pour les quatre variables continues (RUM, ALT, CPS et HCC), les deux paramètres C_1 et C_2, ont été déterminés en utilisant l'algorithme *k-means*. Comme les valeurs sont obtenues à partir d'un jeu de données, leur signification doit être toutefois vérifiée par expertise. Par exemple, la figure 8 (en haut à gauche) montre que RUM est complètement faible pour des valeurs inférieures à 93 mm (valeur du paramètre C_1). Zufferey et Murisier (2006) observent que des parcelles avec des valeurs de RUM inférieure à 100 mm sont sensibles au stress hydrique, ainsi un fort degré d'appartenance à la partition 'Faible' signifie que, suivant les conditions climatiques locales, un stress hydrique peut être observé.

Les données utilisées pour calibrer notre nouvelle méthode ont une large gamme de variation. Ceci est illustré par les histogrammes montrant les distributions des variables d'entrée, avec les intervalles des classes déterminés suivant la méthode de Sturges (Sturges 1926). Les histogrammes sont représentés en figure 8 ainsi que les partitions floues correspondantes.

Nous pouvons évoquer deux points pour résumer les caractéristiques de notre approche concernant le partitionnement des variables d'entrées :

i. Les variables discrètes sont partitionnées par connaissance experte. Suivant les conditions locales certaines classes ne sont pas bien représentées.
ii. Les partitions des variables continues sont automatiquement générées à partir de la base de données. Elles ont besoin d'être interprétées et validées par expertise.

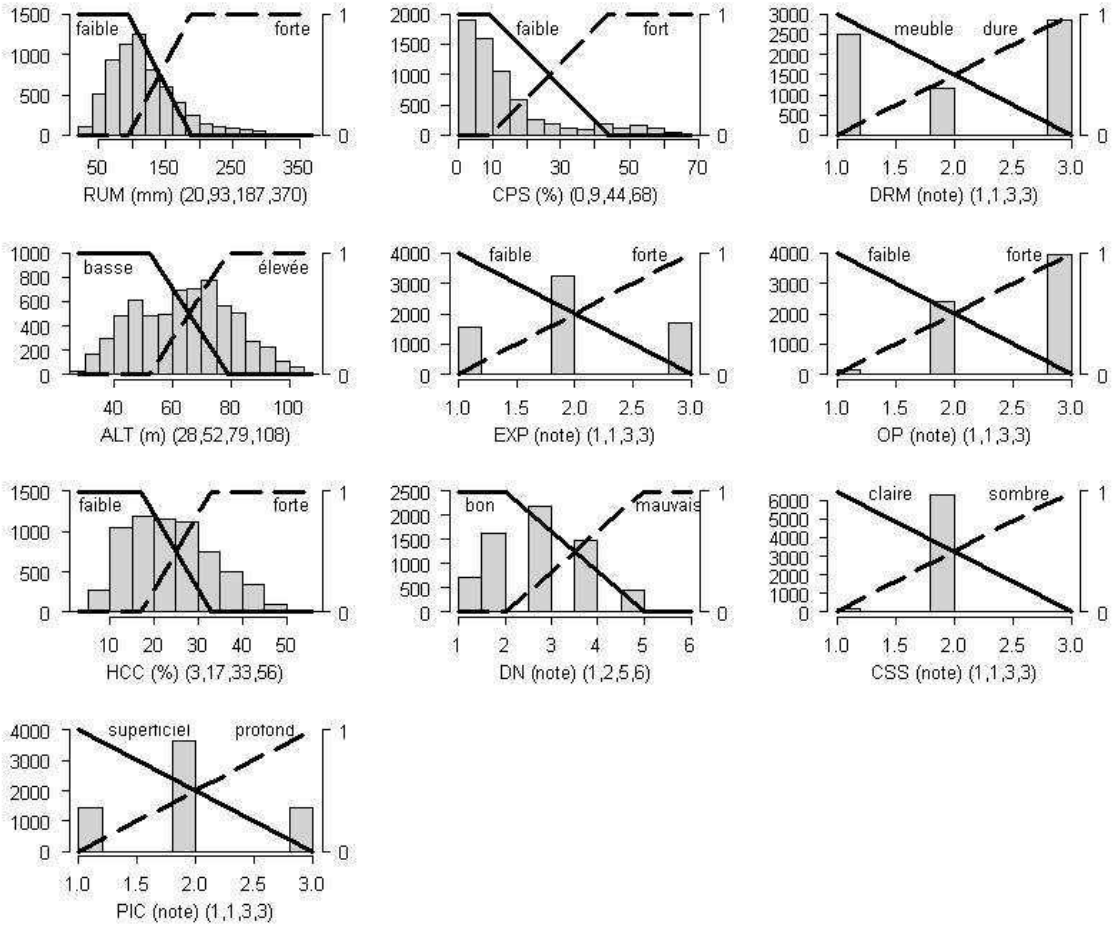


Figure 8 : Histogrammes montrant les distributions des variables d'entrée et leurs partitions floues pour la base de données de Saumur. Les valeurs entre parenthèses correspondent aux (minimum, premier paramètre flou C_1, second paramètre flou C_2, maximum). Les intervalles des classes sont déterminés suivant la méthode de Sturges (1926). RUM : réserve en eau utile maximale, CPS : pourcentage de cailloux sur le profil, DRM : dureté de la roche-mère, ALT : altitude, EXP : exposition, OP : ouverture du paysage, HCC : humidité à la capacité au champ, DN : drainage naturel, CSS : couleur de la surface du sol, PIC : profondeur d'enracinement maximal.

5. Génération des règles de décision agrégeant les variables

Les règles expertes pour évaluer les quatre variables composites : vigueur liée aux facteurs du milieu (VIG_MIL), pédoclimat thermique (PED), mésoclimat thermique (MES) et précocité liée aux facteurs du milieu (PRE_MIL) sont indiquées tableaux 6 à 9. Comme attendu, la variable d'entrée RUM influence l'estimation de VIG_MIL deux fois plus que les autres variables (Tableau 6) . Par exemple, les règles 1 et 5 diffèrent uniquement par le niveau de RUM, la valeur de sortie de VIG_MIL est de 1 pour une faible valeur de RUM (Faible) et de 2 pour une valeur élevée (Forte). Les règles 1 et 2 diffèrent uniquement par le niveau de CPS, qui a un impact plus faible sur VIG_MIL, les valeurs de sortie des règles changent de 1 (CPS élevé) à 1.5 (CPS faible). Les combinaisons des trois variables d'entrée de VIG_MIL aboutissent à 5 valeurs de sortie distinctes.

Dans le tableau 6, nous avons indiqué en grisé le mode de calcul utilisé pour transposer les relations de l'ancienne méthode.

Tableau 6 : Règles de décision de la variable VIG_MIL : vigueur liée aux facteurs du milieu. RUM : réserve en eau utile maximale du sol, CPS : pourcentage de cailloux sur le profil du sol, DRM : dureté de la roche-mère. En grisé le mode de calcul pour transposer les relations de l'ancienne méthode.

Règles	Si RUM	et CPS	et DRM	alors VIG_MIL
1	Faible (2x1 = 2)	Fort (1)	Dure (1)	2+1+1 = 4 → 1
2	Faible (2x1 = 2)	Faible (2)	Dure (1)	2+2+1 = 5 → 1.5
3	Faible (2x1 = 2)	Fort (1)	Meuble (2)	2+1+2 = 5 → 1.5
4	Faible (2x1 = 2)	Faible (2)	Meuble (2)	2+2+2 = 6 → 2
5	Forte (2x2 = 4)	Fort (1)	Dure (1)	4+1+1 = 6 → 2
6	Forte (2x2 = 4)	Faible (2)	Dure (1)	4+2+1 = 7 → 2.5
7	Forte (2x2 = 4)	Fort (1)	Meuble (2)	4+1+2 = 7 → 2.5
8	Forte (2x2 = 4)	Faible (2)	Meuble (2)	4+2+2 = 8 → 3

Pour l'estimation de PED (Tableau 7), les trois variables d'entrée ont des poids différents, ce qui aboutit à sept valeurs de sortie différentes.

Tableau 7 : Règles de décision de la variable PED : pédoclimat thermique. HCC : humidité à la capacité au champ, DN : drainage naturel, CSS : couleur de la surface du sol.

Règles	Si HCC	et DN	et CSS	alors PED
1	Forte	Mauvais	Claire	1
2	Forte	Mauvais	Sombre	1.3
3	Forte	Bon	Claire	1.8
4	Forte	Bon	Sombre	2
5	Faible	Mauvais	Claire	2
6	Faible	Mauvais	Sombre	2.3
7	Faible	Bon	Claire	2.8
8	Faible	Bon	Sombre	3

La topographie (TOP) joue un rôle particulier dans l'estimation de la variable mésoclimat thermique (MES), qui apparaît dans les règles données en tableau 8. Si la parcelle est située dans un thalweg ou un bas de pente (règle 1), la conclusion est 1, quelle que soit la valeur des autres variables. Si la parcelle n'est située ni dans un thalweg, ni en bas d'une pente (règles 2 à 9), les trois autres variables (ALT, EXP et LOP) ont le même poids, ce qui amène à quatre conclusions distinctes.

Tableau 8 : Règles de décision de la variable MES : mésoclimat thermique. TOP : topographie, ALT : altitude, EXP : exposition, OP : ouverture du paysage; Top 1 : thalweg ou bas de pente, Top 2 : autre topographie.

Règles	Si TOP	et ALT	et EXP	et OP	alors MES
1	Top 1	Faible ou Forte	Faible ou Forte	Faible ou Forte	1
2	Top 2	Forte	Faible	Faible	1
3	Top 2	Forte	Forte	Faible	1.7
4	Top 2	Faible	Faible	Faible	1.7
5	Top 2	Forte	Faible	Forte	1.7
6	Top 2	Faible	Faible	Forte	2.3
7	Top 2	Forte	Forte	Forte	2.3
8	Top 2	Faible	Forte	Faible	2.3
9	Top 2	Faible	Forte	Forte	3

Tableau 9, les quatre variables d'entrée de PRE_MIL ont le même poids, ainsi il y a cinq valeurs de sortie distinctes entre 1 et 3.

Tableau 9 : Règles de décision de la variable PRE_MIL : précocité liée aux facteurs du milieu. VIG_MIL : évaluation du niveau de vigueur, PED : pédoclimat thermique, MES : mésoclimat thermique, MRD : profondeur de densité racinaire maximale.

Règles	Si VIG_MIL	et PED	et MES	et PIC	alors PRE_MIL
1	Forte	Froid	Froid	Profond	1
2	Faible	Froid	Froid	Profond	1.5
3	Forte	Froid	Froid	Superficiel	1.5
4	Forte	Froid	Chaud	Profond	1.5
5	Forte	Chaud	Froid	Profond	1.5
6	Faible	Froid	Froid	Superficiel	2
7	Faible	Froid	Chaud	Profond	2
8	Faible	Chaud	Froid	Profond	2
9	Forte	Froid	Chaud	Superficiel	2
10	Forte	Chaud	Froid	Superficiel	2
11	Forte	Chaud	Chaud	Profond	2
12	Faible	Froid	Chaud	Superficiel	2.5
13	Faible	Chaud	Froid	Superficiel	2.5
14	Faible	Chaud	Chaud	Profond	2.5
15	Forte	Chaud	Chaud	Superficiel	2.5
16	Faible	Chaud	Chaud	Superficiel	3

Le raisonnement et les règles de décision sont génériques, par exemple une faible réserve en eau du sol (RUM) confère une faible vigueur (VIG_MIL) quelle que soit la zone étudiée. Les règles retranscrivent la connaissance experte, qui est exprimée en langage naturel avec des termes linguistiques. Les poids donnés aux différentes variables ont un impact sur les valeurs de sortie des règles de décision de la variable composite. Comme pour la précédente méthode, les règles de décision couvrent l'ensemble des situations possibles.

6. Étude du fonctionnement du système construit

Dans le modèle informatique utilisé, les paramètres de partitionnement des variables d'entrée sont déterminés par expertise et analyse de bases de données. Comme précédemment souligné, une étape importante lors de la construction du modèle informatique correspond à étudier la représentativité de ses évaluations et son mode de fonctionnement, lorsque le modèle est confronté à des données réelles. La base de données constituée sur le vignoble de Saumur a été utilisée pour cet objectif.

La gamme de variation de chaque variable de sortie composite (de 1 à 3) est bien représentée dans ce vignoble (avec un degré de précision de +/- 0.2; le minimum de PRE_MIL est 1.2 et le maximum de PED 2.9). Les distributions des quatre variables de sortie sont présentées sur la figure 9.

Les différentes valeurs de VIG_MIL sont représentées dans les mêmes proportions, excepté autour de la valeur 1.5 où il y a plus de points de sondage avec une faible réserve en eau, une roche-mère dure et un faible pourcentage de cailloux sur le profil.

Peu de points de sondage ont une faible valeur pour la variable MES c'est à dire un mésoclimat froid, correspondant aux situations topographiques spécifiques des thalwegs et bas de pentes.

Il existe une plus forte proportion de points avec une valeur élevée pour PED c'est à dire un pédoclimat chaud, caractérisé par une faible humidité à la capacité au champ (entre 6 et 17 %) et un bon drainage (1 ou 2 sur l'échelle de Jamagne). Ces situations correspondent aux roches-mères dures de type craie du Turonien, fréquemment présentes dans la zone d'étude. Toutefois la valeur maximale de PED est de 2.9 car il n'y a pas de combinaisons entre une couleur du sol foncée, une faible humidité à la capacité au champ et un bon drainage (< 2). Cette situation peut toutefois être fréquemment rencontrée pour d'autres sols de la moyenne vallée de la Loire, notamment dans le cas d'alluvions anciennes.

La majorité des points ont un niveau de précocité estimé moyen, la distribution des valeurs de PRE_MIL est quasiment gaussienne.

La gamme des valeurs des variables VIG_MIL, MES, PED et PRE_MIL observée sur cette même zone d'étude, met en avant l'intérêt d'adapter les pratiques culturales et notamment le porte-greffe, en plantant par exemple du Riparia Gloire de Montpellier ou du 101-14, pour compenser un potentiel de vigueur lié aux facteurs du milieu élevé.

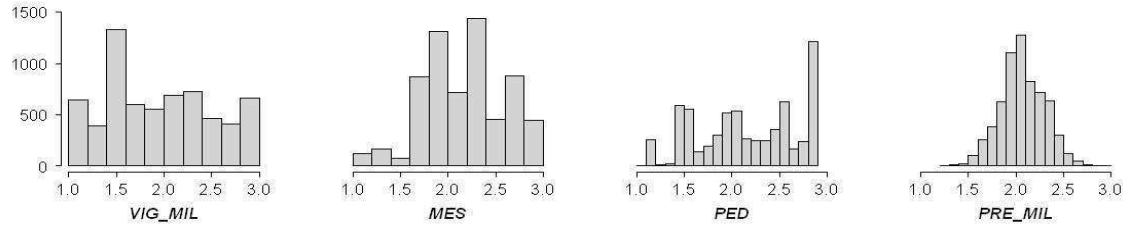


Figure 9 : Histogrammes montrant les distributions des valeurs des variables composites construites. VIG_MIL : vigueur liée aux facteurs du milieu, MES : mésoclimat thermique, PED : pédoclimat thermique, PRE_MIL : précocité liée aux facteurs du milieu. Les intervalles des classes ont été déterminés suivant la méthode de Sturges (1926).

En utilisant les principes de la logique floue, la nouvelle méthode de calcul permet une estimation continue de la variable de sortie, comme montré figure 10. La variable VIG_MIL est représentée en fonction des variables RUM et CPS, la variable DRM étant fixée à sa valeur intermédiaire. Pour faciliter la comparaison, les valeurs de C_1 et C_2 sont identiques à celles indiquées dans (Morlat et al. 2001) : 50 et 100 mm pour RUM, 20 et 40 % pour CPS. Avec l'ancienne méthode de calcul (partie gauche Figure 10), les effets de seuil induisent un large plateau et des transitions brusques. Ces inconvénients sont évités avec la nouvelle méthode (partie droite Figure 10).

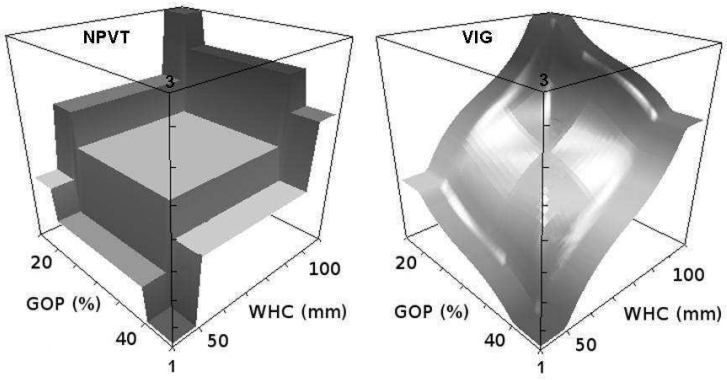


Figure 10 : Estimation de la vigueur liée aux facteurs du milieu. Variable 'NPVT' calculée suivant l'ancienne méthode de calcul de Morlat et al. (2001) (schéma de gauche) et suivant la nouvelle méthode, variable 'VIG_MIL' (schéma de droite). Les valeurs de NPVT et VIG_MIL sont générées pour plusieurs valeurs de RUM : la réserve en eau utile maximale du sol et de CPS : le pourcentage de cailloux sur le profil du sol, en considérant une dureté de la roche-mère intermédiaire. Les valeurs de NPVT sont ramenées à une échelle comprise entre 1 et 3.

Considérons deux parcelles (parcelle 1 et parcelle 2) caractérisées par une dureté 'Moyenne' c'est à dire 'Tendre' de leur roche-mère et le même pourcentage de cailloux sur le profil (10 %) mais avec des valeurs de réserve en eau utile maximale différentes (parcelle 1 : 59 mm et parcelle 2 : 99 mm). En utilisant l'ancienne méthode de calcul, les deux parcelles ont la même valeur de NPVT (2.25, la variable peut seulement prendre neuf valeurs sur une échelle entre 1 et 3 avec une précision de +/- 0.25), malgré leurs valeurs différentes de réserve en eau.

La valeur de la parcelle 2 aurait alors dû être modifiée par expertise et remontée à 2.75 pour être plus proche de la réalité. Avec le nouveau modèle informatique de calcul, les valeurs inférées de VIG_MIL sont respectivement 2.0 et 2.8, ce qui est beaucoup plus satisfaisant.

Ceci illustre le fait que la nouvelle méthode évite une reclassification par expertise des parcelles ayant des valeurs proches des limites de classes. Toutes les procédures d'estimation de la vigueur et de la précocité conférées par le milieu peuvent être désormais complètement automatiques. L'estimation de ces variables est désormais plus précise (une échelle continue de 1 à 3) et plus proche de la réalité, ce qui réduit les approximations et donc les erreurs, et permet ensuite d'envisager de les agréger, avec d'autres variables, comme celles caractérisant l'effet des pratiques.

7. Analyse de la sensibilité des paramètres des partitions

Comme précédemment présenté, la sensibilité aux paramètres des fonctions d'appartenance a été étudiée pour les quatre variables continues (RUM, CPS, HCC et ALT) et chacun des trois systèmes d'inférence floue correspondants (VIG_MIL, PED et MES).

Pour chaque variable composite VIG_MIL, PED et MES, nous avons utilisé un jeu de données théorique incluant toutes les combinaisons des valeurs couvrant l'ensemble du domaine de variation des variables (dix valeurs pour les variables continues et l'ensemble des valeurs pour les variables discrètes). Pour VIG_MIL nous avons pris en compte les valeurs de RUM suivantes : 74 (minimum), 93 (C_1), 106, 119, 133, 146, 160, 173, 187 (C_2) et 224 (maximum) mm, les valeurs de CPS suivantes : 7 (minimum), 9 (C_1), 14, 19, 24, 29, 34, 39 (C_2) et 44 (maximum) %; pour PED, les valeurs de HCC suivantes : 14 (minimum), 17 (C_1), 19, 22, 24, 26, 28, 31, 33 (C_2) et 40 (maximum) % et pour MES, les valeurs de ALT suivantes : 41 (minimum), 52 (C_1), 56, 60, 64, 67, 71, 75, 79 (C_2) et 95 (maximum) m.

Pour chaque variable continue testée, les paramètres C_1 et C_2 ont varié l'un après l'autre de +/- 20% (Tableau 10).

Tableau 10 : Valeurs des paramètres, pour les variables continues, utilisées dans l'analyse de sensibilité (RUM : réserve en eau utile maximale du sol, CPS : pourcentage de cailloux sur le profil du sol, HCC : humidité à la capacité au champ et ALT : altitude).

Variables d'entrée	C_1		C_2	
	- 20%	+ 20%	- 20%	+ 20%
RUM (mm)	74	112	150	224
CPS (%)	7	11	35	53
HCC (%)	14	20	26	40
ALT (m)	42	62	63	95

Le tableau 11 montre qu'une variation de 20 % des paramètres des partitions des variables d'entrée amène à une variation non négligeable des valeurs des variables de sortie, et plus particulièrement pour les paramètres des partitions de RUM. Lorsqu'un des deux

paramètres décroit, VIG_MIL diminue de 0.4, soit de 20%, rapportés à son domaine de variation. Lorsque les paramètres des partitions de CPS varient, VIG_MIL varie de plus ou moins 10 %. La variation des paramètres des partitions de HCC entraîne une variation de PED de plus ou moins 15 %. MES varie de plus ou moins 10 % lorsque les paramètres des partitions de ALT varient.

Tableau 11 : Variation des valeurs des variables de sortie (VIG_MIL : la vigueur liée aux facteurs du milieu, PED : le pédoclimat thermique et MES : le mésoclimat thermique) lorsque que les valeurs des paramètres C_1 et C_2 des variables d'entrée continues (RUM : réserve utile en eau maximale du sol, CPS : pourcentage de cailloux sur le profil du sol, HCC : humidité à la capacité au champ et ALT : altitude) varient de plus ou moins 20%.

Variables composites	Variables d'entrée	C_1		C_2	
		- 20%	**+ 20%**	**- 20%**	**+ 20%**
VIG_MIL [1;3]	RUM (mm)	0.4	- 0.4	0.4	- 0.4
	CPS (%)	- 0.2	0.2	- 0.2	0.2
PED [1;3]	HCC (%)	- 0.3	0.2	- 0.2	0.3
MES [1;3]	ALT (m)	- 0.2	0.1	- 0.1	0.2

Pour chaque variable de sortie, la figure 11 permet d'illustrer l'effet individuel de chaque variable d'entrée lorsque les autres sont fixées à une certaine valeur. Prenons un exemple en détaillant l'effet de CPS sur VIG_MIL lorsque les deux autres variables d'entrée, RUM et DRM sont fixées (Figure 12, graphique (a), courbes grises). RUM et DRM ont été fixées pour prédire i. la plus faible valeur de VIG_MIL, soit RUM < 20mm et DRM = '3-dure', ii. la plus forte valeur de VIG_MIL, soit RUM > 187mm et DRM = '1-meuble' et iii. des valeurs intermédiaires qui correspondent aux valeurs des intersections des deux ensembles flous, soit 140 mm pour RUM et la valeur '2-tendre' pour DRM. L'impact de CPS sur VIG_MIL est représenté graphiquement pour chacune de ces trois combinaisons. Les relations entre les variables d'entrées et la variable composite de sortie sont monotones mais non linéaires, comme le montre la courbe intermédiaire. Ceci est une caractéristique de la modélisation obtenue en utilisant des ensembles flous.

Si nous menons une étude similaire pour évaluer l'impact de DRM sur VIG_MIL, nous observons que les courbes de réponse sont identiques, ceci est dû au fait que CPS et DRM ont le même poids dans la base des règles. Toutefois, nous pouvons observer le poids plus important de RUM étant donné une plus forte amplitude de VIG_MIL entre les courbes (une amplitude de 1 pour RUM et seulement de 0.5 pour CPS et DRM). Cette représentation permet d'évaluer visuellement les relations entre les variables : par exemple VIG_MIL qui augmente lorsque RUM augmente et qui diminue lorsque CPS augmente. Des interprétations similaires peuvent être faîtes concernant l'impact de HCC, DN et CSS sur l'estimation de PED ; de ALT, EXP et OP sur l'estimation de MES; et de VIG_MIL, PED, MES et PIC sur l'estimation de PRE_MIL. Tous les graphiques correspondant sont présentés en figure 11.

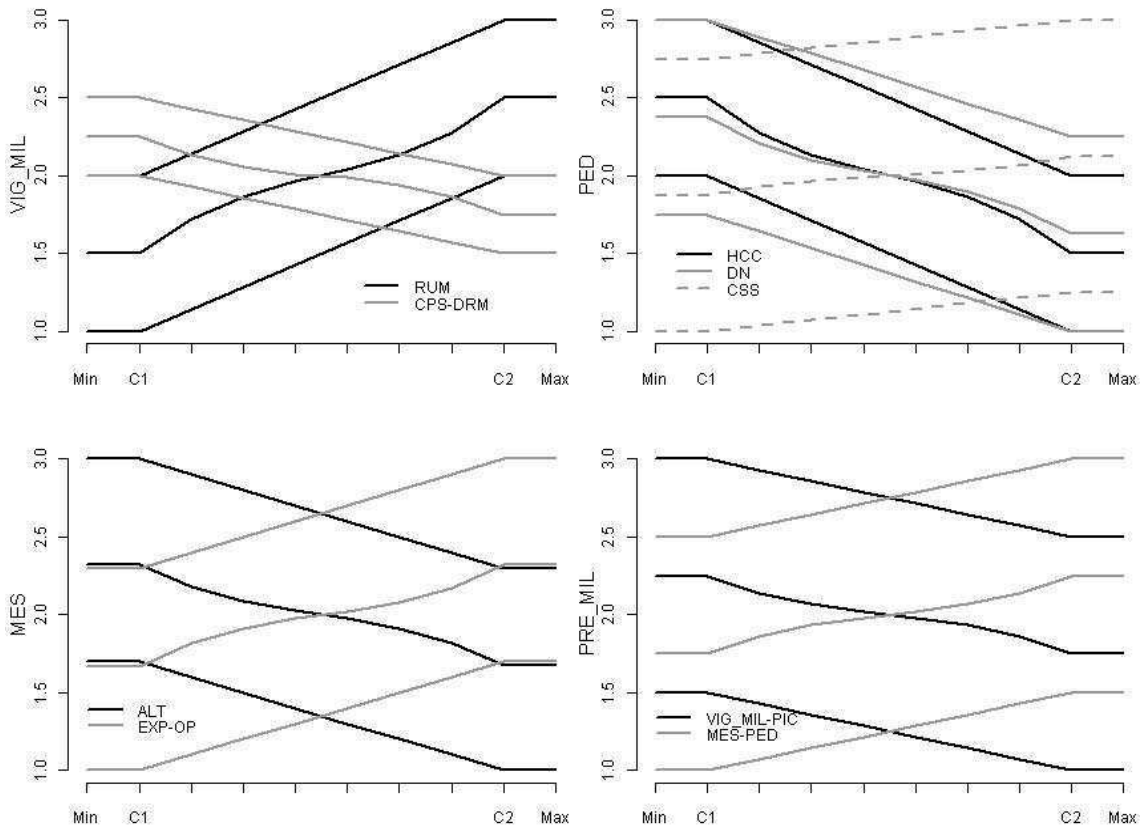


Figure 11 : Impact individuel de chaque variable d'entrée sur les valeurs de la variable de sortie. (VIG_MIL : vigueur liée aux facteurs du milieu, MES : mésoclimat thermique, PED : pédoclimat thermique, PRE_MIL : précocité liée aux facteurs du milieu, RUM : réserve en eau maximale du sol, CPS : pourcentage de cailloux sur le profil, DRM : dureté de la roche-mère, HCC : humidité à la capacité au champ, DN : drainage naturel, CSS : couleur de la surface du sol, ALT : altitude, EXP : exposition, OP : ouverture du paysage, PIC : profondeur d'enracinement maximal), min : minimum, C1 et C2 : paramètres flous, max : maximum. Trois combinaisons des valeurs des variables d'entrée fixées sont considérées, ce qui correspond aux trois courbes : valeur fixée pour prédire la plus faible valeur de la variable de sortie (courbe du bas), la plus forte (courbe du haut) et valeur qui correspond à l'intersection entre les deux ensembles flous (courbe intermédiaire).

Ainsi la réponse du modèle informatique et sa représentation, comme montrée en figure 11, permettent d'évaluer l'impact individuel de chaque variable d'entrée.

8. Validation et utilisation du système construit

Les variables composites construites dans cette étude peuvent avoir un statut d'indicateur. Gras et al. (1989) définissent un indicateur comme 'une variable qui apporte de l'information sur d'autres variables qui sont difficiles à obtenir (…) et qui peut être utilisé comme un outil pour prendre une décision'. Mitchell et al. (1995) considèrent les indicateurs comme 'des mesures alternatives (…) pour mieux comprendre les systèmes complexes (…) ce qui permet de prendre des décisions de gestion pour répondre aux objectifs'. La vigueur (VIG_MIL) et la précocité (PRE_MIL) d'une parcelle liées aux facteurs du milieu peuvent constituer des

indicateurs pour adapter le choix du matériel végétal et les pratiques culturales. L'estimation du mésoclimat (MES) peut aussi permettre d'adapter la date de taille, une parcelle avec un mésoclimat froid pourra être taillée plus tard afin de minimiser le risque de gel.

Bockstaller et Girardin (2003) soulignent que les indicateurs sont utilisés pour évaluer des processus complexes mais qu'ils n'ont pas toujours d'équivalents quantitatifs. Ils précisent que de nombreux indicateurs ne peuvent pas être validés de la même manière que les modèles de simulation, par comparaison avec des données mesurées. Ils proposent une approche en trois étapes : la validation du mode de construction, la validation de l'estimation de la variable de sortie et une validation par l'usage. Cloquell-Ballester et al. (2006) considèrent une approche similaire pour valider des indicateurs environnementaux et sociaux : une validation par l'équipe qui a construit les indicateurs pour s'assurer des performances correctes des indicateurs et garantir leur renseignement correct; une étape de validation scientifique en intégrant le jugement d'experts indépendants et une étape de validation intégrant l'avis des utilisateurs. Comme le recommandent ces auteurs, nous avons procédé à une validation du mode de construction et des estimations des variables de sortie en étudiant finement le fonctionnement du système grâce à des analyses de sensibilité. Nous avons confronté la méthode à une base de données. Nous avons aussi soumis la méthode et le modèle à nos pairs par le biais de publications.

Nous avons amélioré la précédente méthode en utilisant un modèle basé sur des systèmes d'inférence floue. Notre nouvelle méthode, utilisant les principes de la logique floue, permet de prendre en compte l'imprécision sur les données d'entrée, grâce à une transition progressive entre les classes. Toutefois des paramètres liés au partitionnement des variables doivent être fixés. L'évaluation du fonctionnement du système, en fonction des valeurs de ces paramètres, est satisfaisante et confirme l'efficience du nouveau mode de construction. Les paramètres du nouveau modèle sont validés sur des bases de données. Les relations entre les variables sont bien respectées. Toutefois, pour les variables qui sont directement observées par un expert, il est suggéré d'utiliser un référentiel commun pour limiter l'hétérogénéité des observations d'un expert à l'autre au sein de la même zone d'étude.

9. Comparaison des méthodes d'agrégation

La généricité à une nouvelle base de données et de nouveaux utilisateurs a été testée pour comparer les deux méthodes. Les données proviennent de la base de données du Douro au Portugal (Source : Cellule Terroirs Viticoles). Comme précisé précédemment, le raisonnement et les règles de décision présentées dans les tableaux 6, 7, 8 et 9 sont génériques, ce qui permet de réutiliser la base de règles sans la modifier. Les variables d'entrée sont les mêmes et leurs poids sont préservés. Une adaptation a été effectuée concernant la variable 'EXP', l'exposition. L'exposition 'Ouest' est considérée comme une exposition 'Intermédiaire' pour la zone de Saumur et comme une exposition 'Forte' pour le Douro, suivant

l'expertise locale. Les paramètres C_1 et C_2 des ensembles flous des quatre variables continues RUM, CPS, HCC et ALT ont été adaptés (Figure 12). Même si elles ont été modifiées par rapport à celles indiquées dans Morlat et al. (2001), les limites des classes précédemment établies par expertise sont très différentes des paramètres flous déterminés par une analyse *k-means*. Alors que les limites des classes étaient de 50 et 100 mm pour la zone de Saumur, elles ont été modifiées à 100 et 150 mm pour le Douro. En utilisant l'analyse *k-means,* les valeurs des paramètres flous sont plus élevées pour RUM (144 et 290 mm) étant donné des valeurs élevées de réserve en eau pour certains points de sondage.

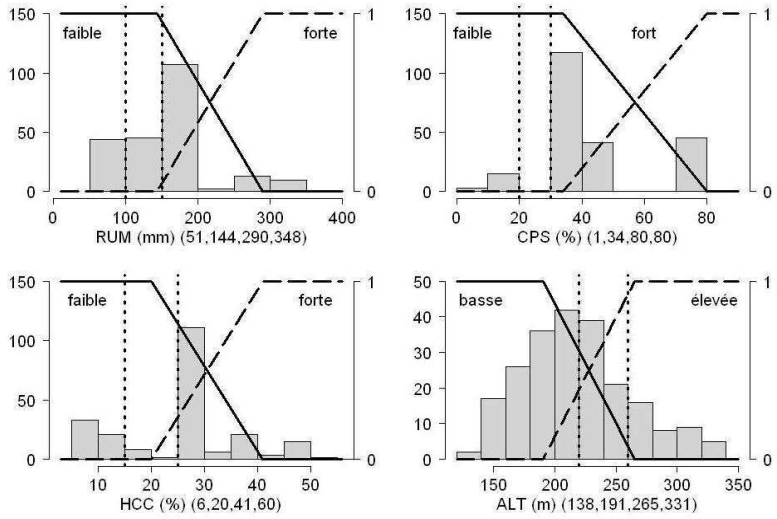


Figure 12 : Histogrammes montrant les distributions des variables d'entrée et leur partitionnement flou pour le vignoble du Douro caractérisé. Les valeurs entre parenthèses correspondent aux (minimum, paramètre C1, paramètre C2, maximum). Les intervalles des classes sont déterminés suivant la méthode de Sturges (1926). RUM : réserve en eau maximale du sol, CPS : pourcentage de cailloux sur le profil du sol, HCC : humidité à la capacité au champ, ALT : altitude. Les lignes verticales en pointillés correspondent aux limites des classes de l'ancienne méthode.

Les utilisateurs ont souligné l'avantage d'une méthode automatique à partir des données recueillies pour générer les valeurs des paramètres du modèle mais ils ont confirmé qu'elles devaient être validées par des experts.

Les résultats de trois méthodes d'estimation du niveau de précocité attribuable aux facteurs du milieu sont présentés sur la figure 13, sous forme de cartes. La carte (a), est obtenue à partir de l'ancienne méthode, la carte (b) correspond aux modifications par expertise locale de la carte précédente, la carte (c) correspond aux résultats obtenus avec la nouvelle méthode de calcul.

La valeur estimée la plus faible de l'ancienne méthode (NPPT = 20) correspond à la valeur 1 de la nouvelle méthode, et la valeur maximale 60 de l'ancienne méthode à la valeur 3. Quatre classes sont considérées : 'Faible', 'Faible à Normale', 'Normale à Forte' et 'Forte'.

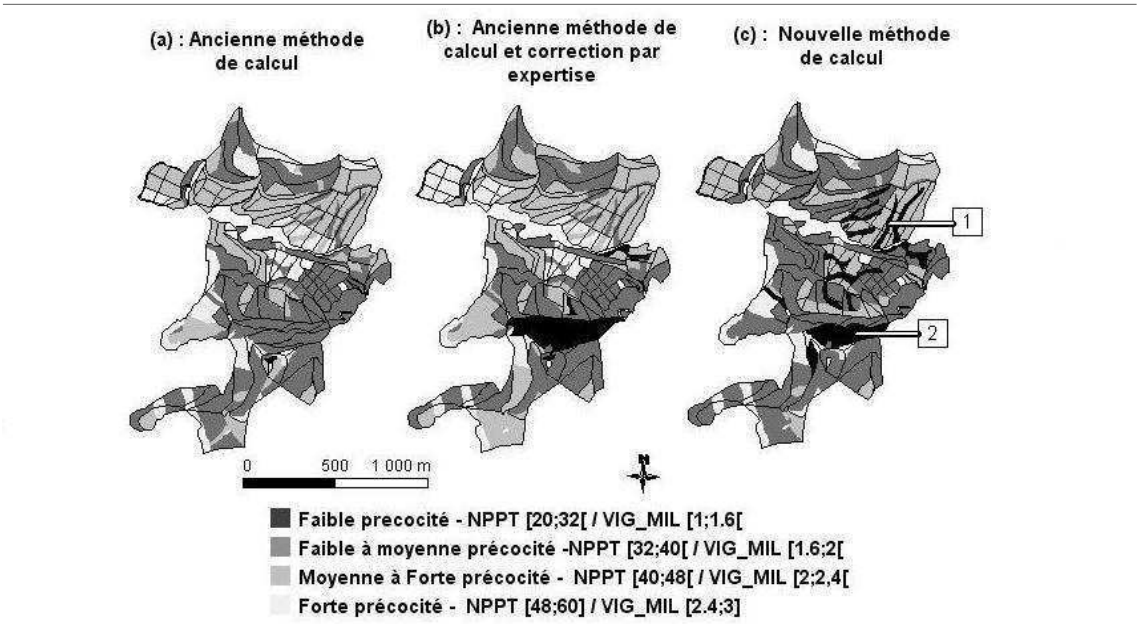


Figure 13 : Estimation de la précocité pour un vignoble situé dans le Douro (Portugal). Carte (a) : ancienne méthode de calcul, carte (b) : ancienne méthode de calcul corrigée par expertise, carte (c) : nouvelle méthode de calcul. Situation 1 : glacis avec des sols profonds et sableux: situation 2 : schistes altérés avec des teneurs élevées en argiles et d'importants mouvements d'eau en profondeur avant le débourrement de la vigne. Les situations 1 et 2 sont des zones à faible précocité non détectée par l'ancienne méthode.

A première vue, l'ancienne méthode ne permet pas d'identifier convenablement les zones à faible précocité. Prenons comme exemple, deux situations appelées situation 1 et 2 sur la figure 13 où une faible précocité est identifiée avec la nouvelle méthode.

La situation 1 est caractérisée par des glacis avec des sols profonds et sableux induisant une forte vigueur (VIG_MIL autour de 2.5) et un pédoclimat froid (PED autour de 1.2), le mésoclimat est intermédiaire (MES autour de 2.3). Toute cette zone est caractérisée comme ayant une précocité 'Faible à Normale' ou 'Normale à Forte' avec l'ancienne méthode. Le pédologue trouve la nouvelle carte plus correcte.

La situation 2 est, d'après lui, aussi une zone à faible précocité, étant donné une unité de terroir spécifique à cet endroit qui conduit à avoir un pédoclimat et un mésoclimat froids (il s'agit des schistes altérés avec des teneurs en argile élevées et un important ruissellement en profondeur avant le débourrement de la vigne).

Pour résumer, les paramètres du modèle informatique (la nouvelle méthode) peuvent facilement être adaptés aux conditions de la zone d'étude. Des analyses statistiques peuvent aider à proposer des paramètres locaux. Les pédologues et chercheurs n'ont donc plus qu'à

valider les valeurs obtenues, ce qui représente une avancée méthodologique. Toutefois, cela peut aussi être intéressant de pouvoir comparer des zones d'étude, ce qui nécessite d'utiliser les mêmes paramètres. La méthode est rapide et satisfait les utilisateurs de la Cellule Terroirs Viticoles.

10. Conclusion

Nous proposons une nouvelle approche utilisant des systèmes d'inférence floue pour estimer la vigueur de la vigne (VIG_MIL), le pédoclimat thermique (PED), le mésoclimat thermique (MES) et la précocité de la vigne (PRE_MIL) attribuables à l'effet des facteurs du milieu (sol, sous-sol et environnement paysager).

Le recours aux systèmes d'inférence floue permet de contrôler et analyser chaque étape de construction du modèle. Cette méthode permet d'avoir une estimation continue des quatre variables de sortie. Elle évite une phase de reclassification par expertise pour corriger les mauvaises estimations dues aux limites de classes qui engendrent des transitions brusques. Ceci est possible étant donné que le modèle manipule des termes linguistiques, implémentés sous forme d'ensembles flous, qui permettent de gérer les changements de classes de façon progressive. La nouvelle méthode permet de combiner efficacement l'analyse de données et la connaissance experte.

Les variables d'entrées sont déterminées suivant des mesures ou des évaluations expertes. Ce dernier type d'acquisition de données entraîne une part de subjectivité. Même si les systèmes d'inférence floue permettent de gérer l'incertitude, il faut veiller, avant d'utiliser ces données comme variables d'entrée du modèle, à l'homogénéité entre les évaluations de différents experts et à l'homogénéité des évaluations au sein d'une même zone d'étude pour des caractéristiques de milieu identiques.

La méthode que nous proposons ici est générique car le raisonnement et les règles de décision du modèle ne sont pas spécifiques à une zone d'étude. Elles retranscrivent fidèlement la connaissance experte concernant les relations entre les variables du milieu et les évaluations de la vigueur, du pédoclimat, du mésoclimat et de la précocité d'une zone.

En utilisant la nouvelle implémentation informatique, des paramètres doivent toutefois être déterminés. Ces paramètres sont facilement adaptables aux conditions locales en combinant l'analyse de données et une validation par expertise.

La méthode a été testée par les techniciens de la Cellule Terroirs Viticoles pour différentes zones d'étude et ils l'ont validée. Après validation, les variables VIG_MIL, PED, MES et PRE_MIL constituent un pool d'indicateurs utilisables pour adapter les pratiques culturales, en prenant aussi en compte les caractéristiques du climat et les interactions entre les facteurs du milieu et les pratiques.

Les systèmes d'inférence floue permettent de prendre en compte l'incertitude sur les données d'entrée grâce à une transition progressive entre les classes d'une variable. Toutefois

la comparaison des valeurs des variables composites VIG_MIL et PRE_MIL avec une évaluation experte nécessite de nouveaux développements méthodologiques pour prendre également en compte a part d'incertitude existante sur ces variables.

Un autre objectif consiste à agréger ces variables avec les pratiques culturales mises en œuvre sur une parcelle (par exemple la vigueur et la précocité conférées par le porte-greffe). Cela permettra de prédire entièrement la vigueur et la précocité d'une parcelle. Avec ce nouveau modèle, il sera possible d'envisager l'optimisation du choix des pratiques culturales pérennes en fonction des facteurs du milieu, dans le but d'atteindre le niveau d'expression végétative de la vigne attendu et de limiter les pratiques culturales correctives. Cela réduira ainsi les coûts de production tout en maximisant le potentiel du terroir. Ces divers aspects sont développés dans la partie suivante.

Chapitre2. Prédiction de la vigueur en fonction des facteurs du milieu et des pratiques

1. Résultats préliminaires

Nous avons quantifié les effets des facteurs du sol, du sous-sol et de l'environnement paysager sur le niveau de vigueur et de précocité de la vigne pour la région du Saumurois. Les données de cette zone d'étude nous ont permis de construire la méthodologie présentée dans la partie précédente. Les variables composites ont été recalculées suivant la nouvelle méthode pour différentes régions de la moyenne Vallée de la Loire précédemment caractérisées suivant la méthode de Morlat et al. (2001).

Suite aux travaux de Bodin et Morlat (2006) et Morlat et Bodin (2006), les techniciens de la Cellule Terroirs Viticoles et l'INRA sont amenés à réaliser, dans le cadre de la caractérisation des terroirs, des enquêtes sur les pratiques culturales utilisées par les viticulteurs. Nous avons dans un premier temps regroupé les informations disponibles. Cela nous a permis de constituer une base de données de 841 parcelles de Cabernet franc avec une Unité Terroir de Base (UTB) majoritaire, c'est-à-dire représentant plus de 50 % de la surface totale de la parcelle considérée. Ces parcelles étaient réparties sur les régions des Fiefs Vendéens, de l'Anjou Village Brissac, du Saumurois et de Chinon. Les principales pratiques culturales, susceptibles d'avoir une influence sur la vigueur et la précocité, étaient connues : porte-greffe, type d'entretien du sol (enherbé ou non), date de taille et nombre de bourgeons laissés à la taille. Pour chaque parcelle la vigueur et la précocité étaient évaluées par le viticulteur exploitant la parcelle ou un technicien viticole.

Il s'agissait de construire les variables composites agrégeant les facteurs du milieu et les pratiques et qui prédiraient les potentiels de vigueur et précocité des parcelles. Nous avions choisi pour cela d'utiliser la méthode basée sur des apprentissages automatiques à partir de connaissances expertes correspondant à des évaluations par les viticulteurs et techniciens

viticoles, évoquée en introduction de ce chapitre et que nous détaillons ci-après.

Ces premiers travaux ont mis en évidence que les viticulteurs n'ont pas le même référentiel. Nous ne pouvons pas mettre en œuvre les méthodes utilisées en analyse sensorielle car ici un seul viticulteur évalue sa parcelle. Certains viticulteurs semblent utiliser plus facilement toute la gamme de notation. Le rôle de l'enquêteur est alors très important, or les données sont issues de plusieurs enquêteurs.

Plusieurs stratégies de sélection de données ont été testées en vain :

- Sélection de groupes de parcelles homogènes (par la méthode des *k-means*) vis-à-vis des variables d'entrée puis vis-à-vis de l'évaluation des viticulteurs. Les groupes obtenus par les *k-means* n'étaient pas stabilisés, c'est à dire que chaque fois que nous refaisions une classification les regroupements de parcelles étaient très différents. Les prédictions n'étaient pas satisfaisantes.

- Sélection des parcelles des viticulteurs qui avaient noté sur plus de la moitié de l'échelle (1 à 3; 2 à 4 ou 3 à 5) puis toute l'échelle (de 1 à 5) pour éliminer les viticulteurs qui n'osaient pas utiliser toute la gamme de variation mais cela éliminait aussi ceux qui notaient de façon homogène mais de manière justifiée étant donné la bonne adaptation de leurs pratiques. Les résultats n'étaient pas satisfaisants non plus.

Morlat (2010) montre de bonnes relations entre les évaluations des viticulteurs et les notes de potentiels de vigueur et précocité conférés par le milieu physique calculés lorsque ceux-ci sont moyennés par Unité Terroir de Base (UTB) (plusieurs parcelles appartiennent à une même UTB) et à l'échelle d'un domaine viticole.

Ce premier travail a mis en évidence les limites de l'utilisation des évaluations des viticulteurs lorsque l'on souhaite analyser une base de données à l'échelle de la parcelle et incluant les parcelles de plusieurs viticulteurs. Ce travail a également mis en évidence qu'il fallait éviter d'avoir recours à des évaluations de différents experts dans l'utilisation du modèle si ceux-ci n'ont pas un référentiel commun. C'est pourquoi cette première base de données a été abandonnée.

Nous souhaitions évoquer ce premier travail mais nous ne nous y attarderons pas plus. Par la suite, nous avons centré le travail sur les parcelles de Cabernet franc de la Cave des Vignerons de Saumur (CVS) avec laquelle une collaboration a été développée.

2. Données utilisées et étapes méthodologiques

Les données ont été obtenues en couplant à l'échelle de la parcelle : la cartographie des facteurs du sol et du sous-sol, la localisation des parcelles, l'observation et les enquêtes auprès des viticulteurs des pratiques culturales mises en œuvre et les observations de la vigueur des parcelles. Les croisements ont été effectués en utilisant les logiciels Microsoft Access v.2003 et Géoconcept v.5.6..

Le maillage des points sondés par les pédologues pour construire la cartographie des facteurs du sol et du sous-sol est serré (Figure 14). Les données de chaque point sont spatialisées par interpolation. Nous avons pris en compte pour chaque parcelle les données de l'Unité Terroir de Base majoritaire sur chaque parcelle.

Figure 14 : Exemple de maillage des points de références géo-pédologiques et de caractérisation de l'environnement paysager. Les parcelles des viticulteurs sont localisées. Les plages de couleur correspondent aux niveaux de vigueur prédits (variable VIG_MIL, de 'Faible' en gris clair à 'Fort' en gris foncé); (données sources : Cellule Terroirs Viticoles).

Les différentes étapes méthodologiques utilisées pour développer les procédures d'apprentissage automatique, afin d'évaluer l'effet conjoint des facteurs du milieu et des pratiques culturales sur la vigueur de la vigne, sont présentées figure 15.

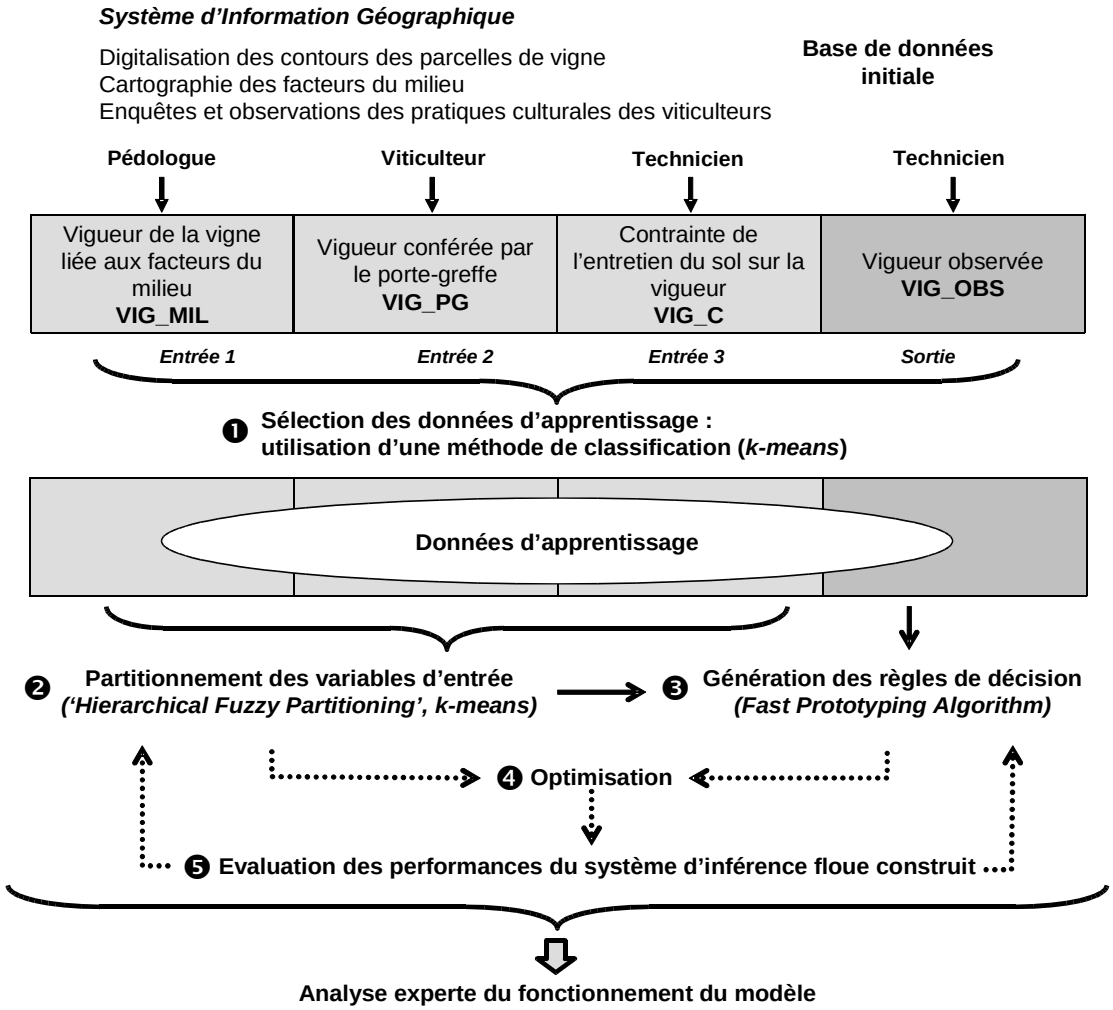


Figure 15 : Étapes méthodologiques utilisées pour développer les procédures d'apprentissage automatique afin d'évaluer l'effet conjoint des facteurs du milieu et des pratiques culturales sur la vigueur de la vigne.

3. Description du cas d'étude et sélection des données d'apprentissage

Le cas d'étude utilisé pour développer la méthode et évaluer les interactions entre les facteurs du sol/sous-sol, les pratiques culturales et la vigueur de la vigne, était localisé en moyenne vallée de la Loire autour de Saumur. Sur cette zone, certaines pratiques culturales sont obligatoires et fixées, car elles sont régulées par le système des cahiers des charges de plusieurs Appellations d'Origine Contrôlée : Saumur, Saumur-Champigny, Saumur Puy-Notre-Dame, Coteaux de Saumur et Saumur brut. De plus, le cépage majoritaire est le Cabernet franc, planté sur toutes les parcelles étudiées. Certaines pratiques sont donc homogènes dans notre base de données. Ainsi nous n'avons pas pris en compte, dans cette étude, certaines pratiques pouvant influencer la vigueur. Ces pratiques sont déjà considérées comme optimales pour les conditions locales et les types de produits attendus. La densité de plantation a par exemple un fort impact sur la vigueur de la vigne (Morlat et al. 1984; Murisier et Zufferey 2006; Carbonneau et al. 2007), elle est fixée pour les AOC du Saumurois entre 4000 et 4500 ceps/ha.

La base de données initiale prise en compte dans l'étude est constituée de 2113 parcelles de viticulteurs coopérateurs. Un important travail, mené en collaboration avec la Cellule Terroirs Viticoles (CTV) et la Cave des Vignerons de Saumur, a été nécessaire en amont pour croiser, en utilisant un logiciel SIG, l'emprise de chaque parcelle et la cartographie des facteurs du milieu. Ces 2113 parcelles ont une UTB majoritaire (> 50% de sa surface). 80 % de ces parcelles (1670) appartiennent à dix-neuf UTB parmi les cent quarante deux identifiées par la CTV. Les caractéristiques des dix-neuf UTB et le nombre de parcelles par UTB sont présentés tableau 12.

Le nombre de parcelles à prendre en compte devait être issu d'un compromis entre, d'une part, un nombre suffisant pour mettre en œuvre la méthode d'apprentissage automatique et assurer une diversité des situations étudiées, mais aussi, d'autre part, un nombre raisonnable pour pouvoir réaliser des observations sur l'ensemble des parcelles prises en compte. Nous avons choisi de prendre en compte huit parcelles pour chacune des dix-neuf UTB, ce qui nous a permis de sélectionner 152 parcelles d'études, nombre répondant aux deux contraintes que nous venons d'évoquer.

Seules les parcelles dont nous connaissions le porte-greffe et l'année de plantation ont été retenues (soit 1609 parcelles). Nous avons exclu les jeunes vignes < 10 ans et les vieilles vignes >50 ans (il nous restait un pool de 1125 parcelles). Nous nous sommes aussi basés sur le niveau de vigueur observé par les techniciens en 2009 et 2010, connu pour 608 parcelles. Nous avons sélectionné au sein de chaque UTB des parcelles qui s'étageaient sur l'ensemble de la gamme de vigueur observée, en faisant l'hypothèse que cette variabilité était due aux pratiques.

Des sorties sur le terrain, en avril 2011, ont révélé que certaines parcelles étaient en réalité décalées de quelques dizaines de mètres à cause d'erreur de digitalisation. Pour la

région de Saumur, la CTV a uniquement réalisée les relevés géo-pédologiques de terrain. Au moment de notre étude, la CVS était en train de vérifier la localisation de l'emprise des parcelles indiquée dans sa base de données cartographiques. Pour certaines parcelles, présentes dans notre base de données, la mise à jour n'avait pas encore été effectuée. Ceci avait comme conséquence un éventuel changement au niveau des facteurs du milieu de certaines parcelles. La localisation des parcelles et le croisement avec les facteurs du milieu a alors été vérifié pour les 152 parcelles. Aucune parcelle n'était finalement présente sur une UTB différente. Toutefois, certaines valeurs de réserve utile en eau maximale du sol (RUM) et pourcentage de cailloux sur le profil du sol (CPS) ont alors changées. Nous avons ensuite préféré noter à nouveau les vigueurs observées des parcelles en 2011 pour nous assurer que les niveaux de vigueur indiqués pour chaque parcelle correspondaient bien à ceux observés.

Tableau 12 : Unités Terroir de base prises en compte dans l'étude.

Étage	Milieu	Roche-mère	Nombre de parcelles
non daté (Formations superficielles)	Autre	Alluvions anciennes sablo-argileuses à argilo-sableuses	39
non daté (Formations superficielles)	Autre	Alluvions anciennes sablo-graveleuses à sablo-argilo-graveleuses	39
non daté (Formations superficielles)	Autre	Alluvions anciennes diverses / Altération de formations carbonatées (Jurassique, Cénomanien, …)	38
non daté (Formations superficielles)	Autre	Colluvions de matériaux du site	129
Bartonien	Altération	Sables grossiers AS à SA orangé roux micacé et parfois légères passées jaunes vertes	30
Bartonien	Autre	Argiles rubéfiées avec blocage possible	31
Sénonien	Autre	Sables à sables argileux en profondeur avec parfois cailloux de grès	53
Sénonien	Autre	Recouvrements de formations sénoniennes sur formations carbonatées du crétacé supérieur	34
Sénonien	Autre	Argiles légèrement sableuses, ocre roux à vertes et glauconieuses, avec spongolithes ou grès en profondeur	42
Turonien supérieur	Roche	Sables calcaires à aspect falunier et marnes localement rubéfiées	45
Turonien supérieur	Altération		39
Turonien supérieur	Altérite		40
Turonien moyen	Roche	Craie sablo-limono-glauconieuse et micacée	454
Turonien moyen	Altération		313
Turonien moyen	Altérite		140
Cénomanien	Roche	Matériau calcaro-glaucono-micacé, plus ou moins consolidé	20
Cénomanien	Altération		32
Bathonien	Autre	Terres à silex de Brossay	85
Bathonien	Autre	Argiles limoneuses à argiles, peu ou non caillouteuses, souvent compactes,reposant sur un blocage	61

Les évaluations de vigueur ont été réalisées fin juin 2011, par un technicien, pour l'ensemble des 152 parcelles. Empiriquement la gamme de niveau de vigueur entre parcelles est connue comme étant relativement stable au cours des millésimes. Johnson (2003) et Kazmierski et al. (2011) ont montré la stabilité temporelle d'un indice très corrélé à la vigueur de la vigne : le 'Normalized Difference Vegetative Index' (NDVI) (Goutouly et al. 2006).

La variable de sortie du modèle est notée VIG_OBS, elle correspond au niveau de vigueur observé (dans le cas de l'utilisation de la sortie comme donnée d'apprentissage) ou observable (dans le cas de sa prédiction par le modèle).

VIG_OBS a été notée selon quatre valeurs possibles : 'très faible vigueur' (note 1), 'faible vigueur' (2), 'forte vigueur' (3) ou 'très forte vigueur' (4). La notation utilisant quatre classes possibles évite d'avoir une classe 'moyenne'. Nous avons opté pour des notations faites par une seule personne pour s'affranchir d'une éventuelle hétérogénéité liée à divers experts. De plus, nous avons procédé à une séance de calage sur une parcelle expérimentale de l'INRA présentant une très forte variabilité de vigueur et sur des parcelles de viticulteurs, suivies par l'INRA en Anjou depuis 2009, connues pour leur niveau de vigueur très faible ou très élevé. Les poids de bois de taille de ces parcelles étaient compris en 2010 entre en moyenne 193 et 518 g de matière sèche par cep, ce qui représente une large gamme de variation. L'objectif était de bien fixer les bornes de notation : la vigueur la plus faible observée lors de la séance de calage correspondant à la note 1 et la plus forte à la note 4. Nous nous sommes ainsi assurés d'avoir une méthode d'évaluation sur les parcelles plus fiable que celles utilisant des viticulteurs lors des enquêtes réalisées par la CTV et l'INRA (données évoquées section 1. de cette partie).

Trois variables d'entrée ont été prises en compte pour prédire la vigueur :

- **La vigueur liée aux facteurs du milieu (VIG_MIL) :**

Cette variable correspond à la variable composite construite dans la Partie 1. précédente. VIG_MIL est une variable continue qui varie entre 1 (faible vigueur) et 3 (forte vigueur). Toute la gamme de variation est représentée (Figure 19).

- **La vigueur conférée par le porte-greffe (VIG_PG) :**

Le porte-greffe, à l'interface entre le sol et le cépage, interagit avec ce dernier pour modifier la croissance de la plante entière (Ollat et al. 2003). L'influence du porte-greffe sur la vigueur de la vigne a été déterminée d'après (Galet 1998; Institut Français de la Vigne et du Vin et al. 2007) et le document issu de la synthèse des techniciens du Val de Loire utilisé par la Cellule Terroirs Viticoles. Le niveau de vigueur est une variable discrète avec cinq valeurs possibles (Tableau 13).

Tableau 13 : Vigueur conférée suivant le porte-greffe, d'après Galet (1998), Institut Français de la Vigne et du Vin *et al.* (2007) et la synthèse des techniciciens du Val de Loire utilisée par la Cellule Terroirs Viticoles.

Note	Vigueur conférée	Porte-greffe
1	Faible	Riparia, 420A-MG, 44-53M
1.5	Faible à moyenne	101-14, 333EM
2	Moyenne	3309C, Gravesac, Fercal, 420A, 8BB, 161-49, RSB1
2.5	Moyenne à forte	SO4, 5BB, 41B
3	Forte	Rupestris, 1103P, 110R, 99R, 140Ru, 196-17

Il faut préciser que les niveaux de vigueur établis pour chaque porte-greffe sont des niveaux moyens pour différents types de sol.

Ce sont principalement les notes 2 et 2.5 qui sont présentes au sein de la base de données des 152 parcelles (respectivement 51 et 41 % des parcelles). Les notes 1.5 et 3 sont peu représentées (respectivement 3 et 6%). La note 1 est absente du jeu de données.

- **L'effet du mode d'entretien du sol sur la vigueur (VIG_C) :**

Plusieurs modes d'entretien du sol peuvent être mis en œuvre sur une parcelle de vigne : la mise en place d'un enherbement, le désherbage et le travail du sol. L'enherbement de l'inter-rang de vigne limite le ruissellement et l'érosion du sol mais réduit aussi la vigueur de la vigne en raison des compétitions qui s'instaurent entre celle-ci et l'herbe, pour l'alimentation hydrique et azotée (Celette et al. 2009). Cette variable a été construite à partir de deux paramètres : le pourcentage de couverture herbacée du sol et l'intensité de concurrence de l'espèce et variété de la plante d'enherbement. Cette intensité de concurrence a été déterminée à partir de la bibliographie.

La bibliographie disponible est essentiellement issue de travaux des organismes de développement (Chambre d'Agriculture de Rhône-Alpes; Comité de développement du Beaujolais; Institut Technique de la Vigne et du Vin 2002; TECHN'ITAB 2003; Chambre d'Agriculture de la Gironde 2006; Delabays et al. 2006; Celette 2007)). Nous avons réalisé une synthèse présentée tableau 14. Il apparaît des différences d'intensité de concurrence observées pour une même espèce suivant la source bibliographique, aussi nous avons pris en compte une moyenne des intensités observées.

Tableau 14 : Intensité de concurrence de l'enherbement en fonction de l'espèce présente. Références : 1 : Chambre d'Agriculture de Rhônes-Alpes (2011); 2 : TECHN'ITAB (2003); 3 : Comité de développement du Beaujolais (2011); 4 : Chambre d'Agriculture de la Gironde (2006) ; 5 : Centre technique interprofessionnel de la vigne et du vin (2002) ; 6 : Delabays et al. (2006); 7 : Celette (2007).

Référence	Fétuque élevée	Fétuque rouge ½ traçante	Pâturin des près	Ray grass	Orges des rats	Trèfle souterrain	Trèfle blanc nain	Autres espèces naturelles (présentes après la floraison de la vigne)
1	/	Faible	Moyenne	Moyenne à forte	/	/	/	/
2	Forte	Faible à moyenne	Moyenne à forte	Moyenne à forte	/	/	/	/
3	Faible à moyenne	Faible à moyenne	Faible à moyenne	Moyenne à forte	/	Faible à moyenne	Moyenne à forte	/
4	Très forte	Moyenne à forte	Faible	Moyenne à forte	/	/	/	/
5	Forte	Faible à moyenne	Moyenne à forte	Moyenne à forte	/	/	/	/
6	Moyenne à forte	/	Moyenne à forte	/	Faible	Moyenne	/	Faible à moyenne
7	Forte	/	/	/	/	Moyenne à forte	/	Faible à moyenne
Contrainte résultante	**Forte - 3**	**Faible à moyenne – 1.5**	**Moyenne - 2**	**Moyenne à forte – 2.5**	**Faible - 1**	**Moyenne - 2**	**Moyenne à forte – 2.5**	**Faible à moyenne – 1.5**

Nous avons ensuite croisé l'intensité de concurrence avec le pourcentage de couverture de la bande enherbée (Tableau 15). Ce dernier dépend du pourcentage de surface enherbée et de la densité des plantes sur la bande enherbée. Ces deux derniers paramètres ont été observés au mois de juin 2011, période à partir de laquelle l'enherbement peut exercer une concurrence sur la vigne pour cette zone d'étude. Le pourcentage de couverture a ainsi été mesuré et calculé pour chaque parcelle et a été discrétisé en trois classes, grâce à une analyse statistique de classification utilisant l'algorithme *k-means* (MacQueen 1967) et une validation par expertise. Le pourcentage de couverture a été considéré comme 'Faible' pour une couverture inférieure à 10 % de la surface totale de la parcelle et 'Élevé' pour 30 % et plus. Ces valeurs assez basses sont dues au fait que la majorité des parcelles ont une surface enherbée inférieure à 50 % et que, de plus, la densité des herbes peut être faible sur cette bande enherbée au mois de juin (Figure 16).

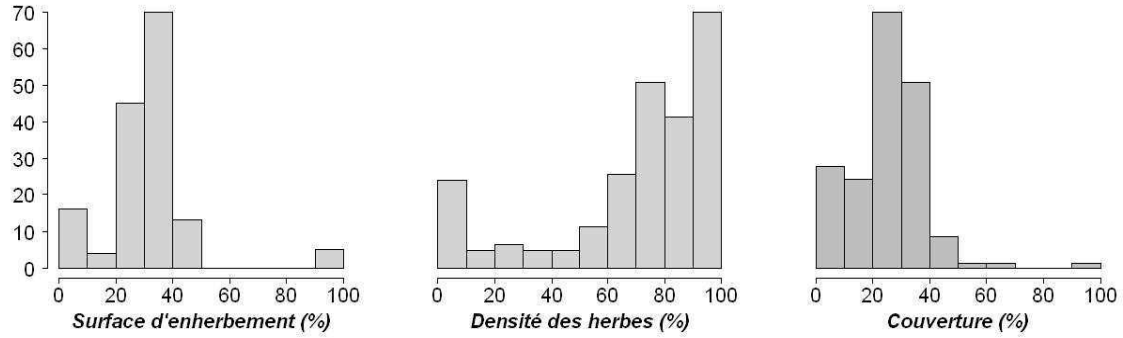


Figure 16 : Distribution des valeurs de surface d'enherbement, densité des herbes sur la bande enherbée et pourcentage de couverture résultante, pour les 152 parcelles d'étude. Les intervalles des classes sont déterminés suivant la méthode de Sturges (1926).

VIG_C est ainsi une variable discrète avec seize valeurs possibles : entre 0, correspondant à aucune concurrence, cas des vignes non enherbées et 3, correspondant à une forte concurrence.

Tableau 15 : Intensité de concurrence produite par l'enherbement vis-à-vis de la vigueur (VIG_C).

		% de couverture		
		Faible	**Moyen**	**Fort**
Intensité de la concurrence produite par l'enherbement en fonction de l'espèce	**Faible**	1	1.5	2
	Faible à moyenne	1.25	1.75	2.25
	Moyenne	1.5	2	2.5
	Moyenne à forte	1.75	2.25	2.75
	Forte	2	2.5	3

Les trois variables les plus influentes sur la vigueur sont prises en compte : la vigueur liée aux facteurs du milieu (VIG_MIL), la vigueur conférée par le porte-greffe (VIG_PG) et l'effet du mode d'entretien du sol sur la vigueur (VIC_C). Toutefois, nous savons que des relations inattendues entre uniquement ces trois variables d'entrée et la variable de sortie, c'est à dire la vigueur observée, peuvent exister. Cela peut être dû notamment à l'effet d'autres pratiques culturales comme une sur ou sous-fertilisation. Nous prenons le cas, dans la base de données, de deux combinaisons des quatre variables qui, pour une même combinaison, ont des parcelles à la fois évaluées avec une très faible vigueur et d'autres avec une très forte vigueur, soit toute la gamme de variation (combinaison 1 : VIG_MIL = 1.7 et VIG_PG = 2.25 et VIG_C = 2.25; combinaison 2 : VIG_MIL = 2.7 et VIG_PG = 2 et VIG_C = 2.25). Nous n'avons donc pas pu utiliser l'ensemble de la base de données pour les apprentissages automatiques.

Nous devions mettre en œuvre des techniques d'apprentissage automatique sur une base de données présentant une forte variabilité mais qui, en même temps, devait présenter des données cohérentes, c'est à dire que des combinaisons identiques entre les variables d'entrée doivent aboutir à des valeurs identiques de vigueur observée. Il était nécessaire de procéder à une sélection des données d'apprentissage. Le même besoin a été souligné par Taskin (2009) concernant la classification d'images. Cet auteur indique que la qualité des

données d'apprentissage n'est, la plupart du temps, pas questionnée et que la base de données est directement utilisée.

Nous proposons, dans une première étape (Figure 17), une méthode simple de sélection de données, basée sur une classification utilisant l'algorithme *k-means* (MacQueen, 1967). La classification a été réalisée en prenant en compte les quatre variables (les trois variables d'entrée VIG_MIL, VIG_PG et VIG_C et la variable de sortie VIG_OBS). La variable de sortie a aussi été prise en compte, car sinon il y aurait eu un risque d'avoir des niveaux de vigueur observés très différents pour des combinaisons identiques de variables d'entrée (même groupe), comme nous avons pu en montrer un exemple précédemment. Les groupes obtenus par l'algorithme k-means dépendent des barycentres initiaux, choisis aléatoirement, aussi nous avons répété la classification *k-means* neuf fois (pour avoir dix classifications). Nous avons ensuite sélectionné les parcelles qui étaient au moins sept, huit, neuf ou dix fois ensembles au cours des dix classifications afin d'éliminer les parcelles présentant, de manière isolée, des combinaisons très différentes. Nous avons considéré que ces parcelles ne pouvaient pas nous servir car d'autres facteurs que nous ne connaissions pas pouvaient peut-être influencer le niveau de vigueur observé. Enfin, nous n'avons conservé que les groupes sans variabilité sur le niveau de vigueur observé et ayant un nombre important de parcelles, pour diminuer les incohérences dans le jeu de données et pour nous assurer de sélectionner les cas les plus présents dans le vignoble étudié. Quatre jeux de données d'apprentissage sont donc disponibles suivant cette démarche. La méthode de sélection est illustrée Figure 17.

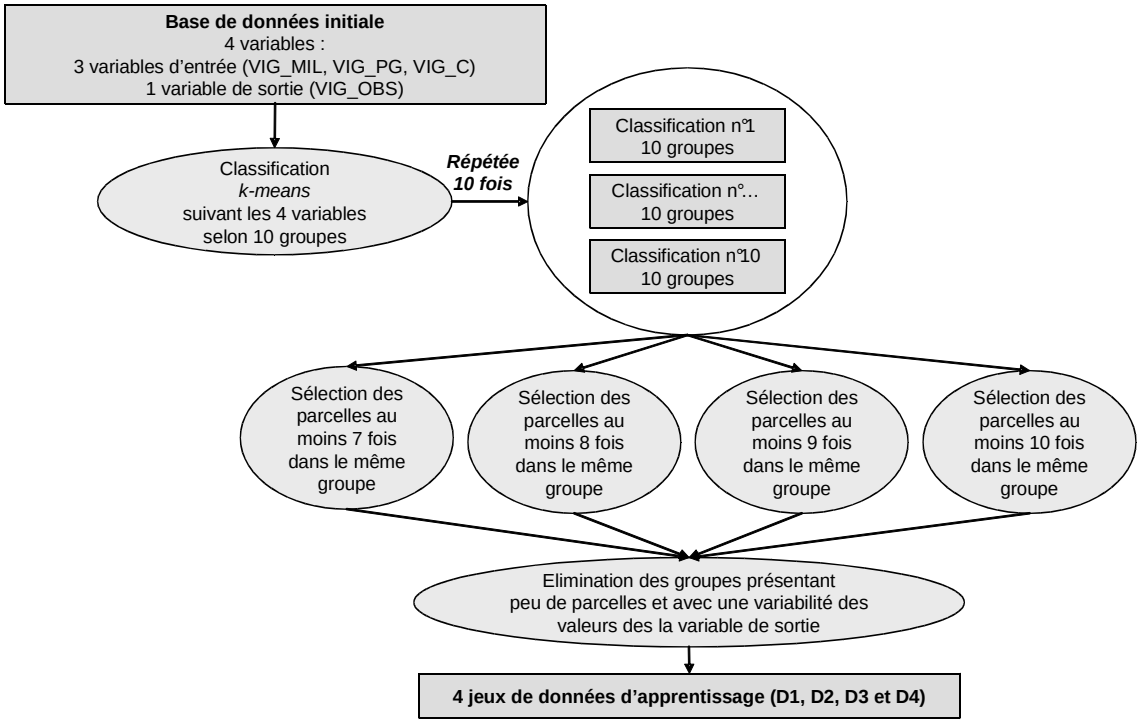


Figure 17 : Méthode de sélection des données d'apprentissage.

4. Méthode d'inférence floue

Nous n'avons pas voulu éliminer l'incertitude sur les données mais plutôt pouvoir la gérer au mieux, aussi, c'est pour cela que nous avons utilisé des méthodes de modélisation utilisant la logique floue de la même manière que dans la partie 1. de ce chapitre. Nous détaillons ci-après les étapes 2, 3 et 4 de notre méthode, visant à construire un système d'inférence floue (SIF) (Figure 15). Nous ne revenons pas sur les bases théoriques de la modélisation floue présentées section 2. de la partie 1. de ce chapitre.

4.1. Partitionnement flou des variables d'entrée

Le nombre d'ensembles flous pour chaque variable a, dans cette partie, été déterminé en utilisant la méthode 'Hierarchical Fuzzy Partitioning' (HFP) (Guillaume et Charnomordic 2004). Suivant cette méthode l'utilisateur définit un nombre maximal d'ensembles flous par variable. Les paramètres des sous-ensembles flous des variables continues ont été déterminés en utilisant l'algorithme *k-means*, indépendamment pour chaque variable, comme pour les travaux présentés partie 1. Les valeurs des barycentres des groupes étant choisies comme valeurs des paramètres. HFP est une méthode itérative qui va tester successivement un nombre de plus en plus important de partitions par variable. Un système d'inférence floue est, à chaque fois, construit, en prenant en compte l'ensemble des règles de décision possibles. Un indice de performance permet de sélectionner le meilleur compromis entre les performances du système construit et un nombre réduit de partitions.

4.2. Génération des règles de décision agrégeant les variables

Les règles ont été automatiquement générées en utilisant le 'Fast Prototyping Algorithm' (FPA) (Glorennec 1999). FPA est une technique rapide, simple et efficace pour générer des règles de décision à partir d'un jeu de donnée d'apprentissage. Cette technique peut être utilisée pour une variable de sortie linguistique (aux classes non ordonnées) ou, comme dans notre cas, pour des variables de sortie continues ou discrètes mais ordonnées. En utilisant FPA, dans un premier temps, toutes les règles correspondant à toutes les combinaisons des ensembles flous des variables d'entrée sont générées. Dans une seconde étape, les valeurs de sortie des règles (C_r) sont initialisées en fonction des valeurs de la variable de sortie présentes dans la base de données, en fonction de l'équation 4.

$$C_r = \frac{\sum_{i \in E_r} \mu_r(x_i) \times y_i}{\sum_{i \in E_r} \mu_r(x_i)}$$

Équation 4 : Calcul des valeurs de sortie des règles (C_r). $\mu_r(x_i)$ est le degré d'activation du ième exemple pour la ième règle, y_i: la valeur de sortie observée pour le ième exemple et E_r : un sous-ensemble choisi suivant le degré d'activation (appelé aussi degré de vérité) minimum de la règle, défini par l'utilisateur.

S'il n'y a pas assez d'exemples (c'est à dire, dans cette étude, des parcelles) qui activent une règle avec un degré supérieur au seuil défini par l'utilisateur, la règle est supprimée. Nous avons fixé le seuil à 0.2 (le degré d'activation d'une règle est compris entre 0 et 1). Toutefois nous n'avons pas exclu les règles activées seulement par un exemple considérant que ce dernier peut représenter plusieurs cas identiques dans le vignoble étudié, ce qui permet de ne pas réduire le niveau de généricité des résultats.

4.3. Optimisation des paramètres et des conclusions des règles

Les valeurs des paramètres du système d'inférence floue (SIF) construit (ceux des partitions et les conclusions des règles) peuvent être optimisées pour augmenter la précision du SIF, sans diminuer l'interprétabilité du système (Casillas et al. 2003; Evsukoff et al. 2009). L'algorithme d'optimisation que nous avons utilisé a été proposé par Glorennec (1999), et est basé sur les travaux de Solis et Wets (1981). Il permet d'optimiser les paramètres et les conclusions des règles du SIF sans changer la structure du système, c'est à dire sans changer le nombre d'ensembles flous et de règles.

Les valeurs des paramètres des variables d'entrée sont optimisées en premier, puis les valeurs de sortie des règles en second. Chaque variable d'entrée est optimisée suivant un ordre, tout d'abord VIG_MIL, puis VIG_PG et enfin VIG_C. Cet ordre dépend de l'importance de chaque variable et a été déterminé précédemment par un arbre de décision flou. Les arbres de décision flous construits en utilisant le logiciel Fispro v.3.4 sont basés sur une implémentation floue de l'algorithme ID3 (Weber 1992).

La base de données utilisée pour les apprentissages a été découpée en un jeu de données pour optimiser le SIF, 70% des parcelles (soit 55) et un jeu de données pour tester l'optimisation, 30% des parcelles (soit 23). Le pourcentage de parcelles pour chaque niveau de vigueur a, à chaque fois, été respecté. Dix couples de jeux de données ont été créés. En utilisant les jeux de données pour optimiser, dix SIF ont ainsi été obtenus. Nous avons calculé un SIF médian, correspondant à la combinaison des dix SIF. Les dix valeurs des paramètres ont été remplacées par leur valeur médiane, ce qui est statistiquement plus robuste que la moyenne (Guillaume et Charnomordic, 2011, soumis).

La procédure d'optimisation est guidée par un indice de performance. Classiquement l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est utilisée pour comparer des valeurs (équation 5).

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{A}\sum_{i=1}^{A}(\hat{y}_i - y_i)^2}$$

Equation 5 : Calcul de l'erreur quadratique moyenne (RMSE). $\hat{y}_i$: valeur inférée par le système d'inférence floue et y_i la valeur observée sur la parcelle, i: parcelle considérée et A: le nombre d'exemples actifs (chaque parcelle correspond à un exemple).

Nous avons utilisé la valeur de sortie brute, c'est à dire une note précise en utilisant les valeurs 1, 2, 3 ou 4 données par l'expert. Nous avons alors utilisé directement le RMSE pour

comparer les valeurs inférées et celles observées par l'expert. Mais, nous avons aussi pris en compte l'incertitude sur ces valeurs. La valeur de sortie qui est considérée comme incertaine a été représentée par des ensembles flous comme montrés sur la figure 18. Pour avoir une incertitude raisonnable, nous avons considéré un support de largeur 1.5 et un noyau de 0.5. Les algorithmes qui présentent ce nouvel indice d'erreur, basé sur des nombres flous, sont détaillés dans (Guillaume et al., 2012, soumis).

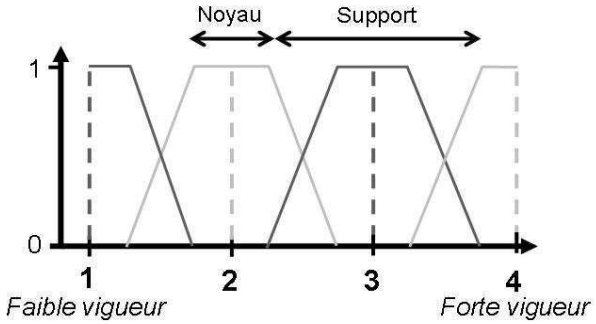


Figure 18 : Représentation incertaine de la valeur de sortie utilisée comme donnée d'apprentissage (la vigueur de la vigne observée par l'expert). Chaque valeur brute donnée par l'expert (lignes en pointillés) est remplacée par une classe représentée par des nombres flous (lignes pleines).

5. Caractéristiques du jeu de données d'apprentissage

Notre objectif était de sélectionner des données d'apprentissage cohérentes. Nous avons utilisé un schéma de sélection simple basé sur une classification *k-means* (Figure 17). Quatre jeux de données (D1 à D4) comprenant les valeurs des trois variables d'entrée VIG_MIL, VIG_PG et VIG_C et de la variable de sortie VIG_OBS ont été obtenus (Tableau 16). Le niveau de vigueur très faible est le moins présent sur la zone étudiée. Les niveaux de vigueur ne sont pas régulièrement distribués dans le jeu de données initial des cent cinquante deux parcelles : seulement seize parcelles (10%) ont une vigueur très faible (1), quarante-cinq (30%) un niveau faible (2), trente-huit (25%) un niveau fort (3) et cinquante-trois (35%) un niveau très fort (4). Cette distribution reflète l'hétérogénéité des niveaux de vigueur et la forte proportion des vigueurs élevées sur le vignoble étudié. Pour conserver cette distribution de parcelles, nous avons sélectionné le groupe avec le plus grand nombre de parcelles pour le niveau (1) et deux groupes pour les niveaux (2), (3) et (4). Nous n'avons pas pu sélectionner deux groupes pour le niveau (1) et trois groupes pour les autres niveaux, le nombre de parcelle du niveau (1) étant insuffisant.

Les quatre jeux de données ont été testés : les trois variables d'entrée ont été partitionnées et les règles ont été générées selon la méthode présentée en section 4.1. et 4.2. de cette partie. Les quatre systèmes d'inférence floue (SIF) construits n'ont pas été optimisés dans cette étape de sélection de données d'apprentissage. L'objectif était, dans cette phase de travail, de construire et sélectionner un SIF initial produisant des prédictions suffisamment

justes.

Tableau 16 : Jeux de données obtenus suite aux dix classifications *k-means.* Le nombre de fois minimum où les parcelles sont dans le même groupe, au cours des dix classifications, est indiqué, entre parenthèses, à côté de l'identifiant du jeu de données. * : jeu de données sélectionné.

Jeux de données	Nombre de parcelles	Niveau de vigueur observée (VIG_OBS)				Nombre de règles	Amplitude des valeurs de sortie des règles	RMSE	r2	Situations gérées par le système (%)
		1 très faible	2 faible	3 forte	4 très forte					
Initial	152	*16 (10%)*	*45 (30%)*	*38 (25%)*	*53 (35%)*					
D1 (10 fois)	55	6 (11%)	6 (11%)	14 (25%)	18 (33%)	18	1.3 - 4	0.65	0.62	98
D2 (9 fois)	76	11 (14%)	24 (32%)	16 (21%)	25 (33%)	18	1.2 - 4	0.70	0.57	92
D3 * (8 fois)	78	10 (13%)	24 (31%)	17 (22%)	27 (35%)	19	1.2 - 4	0.69	0.61	97
D4 (7 fois)	75	11 (15%)	19 (25%)	17 (23%)	28 (37%)	19	1.2 - 4	0.59	0.71	89

Quel que soit le jeu de données, aucune conclusion de règles ne correspond à la valeur la plus faible de la vigueur à savoir 1. Le minimum est 1.2 alors que la valeur maximale 4 est présente (Tableau 16).

Nous avons sélectionné le jeu de données D3 qui a le nombre le plus élevé de parcelles (78). La distribution des niveaux de vigueur est proche de celle du jeu de données initial (Figure 19). Ce jeu de données correspond aussi au meilleur compromis entre un nombre suffisant de règles, une large gamme de fluctuation des valeurs de la variable de sortie et un pourcentage important de situations gérées par le système d'inférence floue construit.

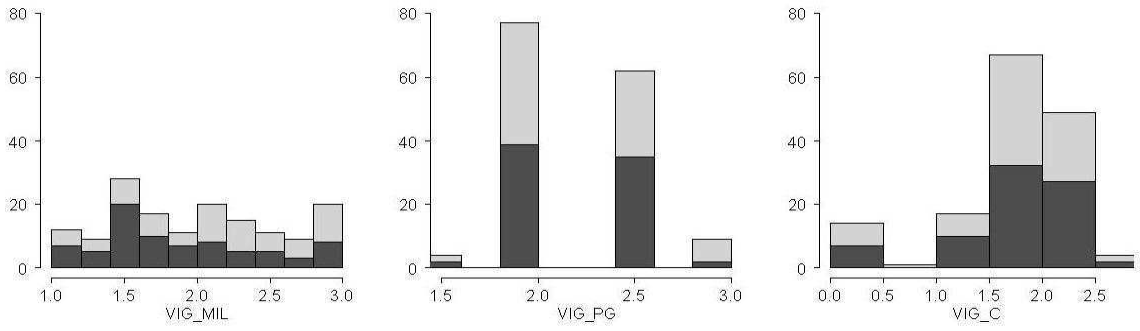


Figure 19 : Distribution des niveaux de vigueur du jeu de données initial des 152 parcelles (en gris clair) et du jeu de données D3 correspondant aux 78 parcelles sélectionnées (en gris foncé).

Le jeu de données D3 a été obtenu suite à la sélection des parcelles qui étaient dans le même groupe au moins huit fois au cours des dix classifications. Cette sélection a abouti à dix-

neuf groupes (#1 à #19), ce qui correspond à un total de cent-quarante huit parcelles (Tableau 17). Quatre parcelles sont considérées comme différentes des autres, ne se rattachant à aucun groupe. Trois groupes ont des valeurs de VIG_OBS différentes au sein du groupe, la variance de VIG_OBS au sein du groupe n'est en effet pas égale à 0 (groupes #3, #8 et #14). Le niveau très faible (1) de VIG_OBS correspond à seulement deux groupes (#1 et #2) ; et le groupe #2 est seulement composé de trois parcelles.

Nous avons sélectionné les sept groupes qui avaient le nombre le plus élevé de parcelles pour chaque niveau de vigueur observée. En conséquence, nous avons éliminé des combinaisons peu présentes dans le jeu de données initial. En considérant le niveau de vigueur (2), cinq groupes ont été constitués, nous avons éliminé le groupe #3 avec une variance de 0.2 et nous avons conservé les groupes #4 (seize parcelles) et #5 (huit parcelles). Pour le niveau (4), il y avait cinq groupes (groupes #15 à 19) ; dans ce cas, pour conserver la distribution des niveaux de vigueur observée, nous avons dû éliminer des groupes avec un nombre important de parcelles (par exemple le groupe #17 avec 1douze parcelles), ne retenant, pour chaque niveau de vigueur que les groupes avec les nombres les plus élevés de parcelles.

Tableau 17 : Caractéristiques des groupes obtenus suite à la sélection des parcelles au moins huit fois dans le même groupe au cours des dix classifications *k-means.* * *:* groupes sélectionnés. VIG_OBS : vigueur observée, VIG_MIL : vigueur liée aux facteurs du milieu, VIG_PG : vigueur conférée par le porte-greffe, VIG_C : concurrence de l'entretien du sol sur la vigueur. Var. : variance; moy. : moyenne.

Groupes	Nombre de parcelles	Moy. VIG_OBS	Var. VIG_OBS	Moy. VIG_MIL	Var. VIG_MIL	Moy. VIG_PG	Var. VIG_PG	Moy. VIG_C	Var. VIG_C
# 1*	10	1	0	1.4	0.1	2.1	0	2.1	0.1
# 2	3	1	0	2.8	0	2.5	0	1.92	0.06
# 3	9	1.8	0.2	2.9	0	1.9	0	2.03	0.12
# 4*	16	2	0	1.8	0	2	0	1.97	0.09
# 5*	8	2	0	1.5	0	2.5	0	1.72	0.1
# 6	6	2	0	2.4	0.1	2.5	0	1.75	0.08
# 7	3	2	0	2.3	0	2	0	1.58	0.06
# 8	7	2.7	0.2	2.5	0.1	2.1	0.1	0	0
# 9*	10	3	0	2.5	0.1	2.5	0	1.9	0.07
# 10*	7	3	0	1.5	0.1	2.5	0	1.71	0.15
# 11	6	3	0	1.4	0.1	2	0	1.92	0.06
# 12	3	3	0	2.1	0	2	0	1.75	0
# 13	2	3	0	2.8	0	2	0	2.25	0.25
# 14	7	3.1	0.4	1.7	0.1	2.4	0.1	0	0
# 15*	14	4	0	2.6	0.1	2	0	1.95	0.18
# 16*	13	4	0	1.4	0	2.6	0	1.83	0.1
# 17	12	4	0	2.1	0	2.7	0.1	1.88	0.06
# 18	10	4	0	1.5	0.1	2	0	2.18	0.08
# 19	2	4	0	2.2	0.2	3	0	1.75	0
	1	1		1		3		2.25	
	1	2		2.4		2		1.75	
	1	2		2.1		2.5		1.75	
	1	3		2.8		2		1	

6. Construction du système d'inférence floue

Les valeurs des paramètres des partitions et des sorties des règles du SIF initial, construit à partir du jeu de données D3, ont été optimisées pour augmenter la précision de ce SIF. Les résultats de l'optimisation dépendent des performances du SIF initial (Guillaume et Charnomordic, 2011, soumis). Les performances du SIF initial étaient correctes avec un RMSE de 0.69 et un r-carré de 0.61 (Tableau 16). Le tableau 18 résume les résultats d'optimisation en comparant la moyenne des résultats des dix jeux de données de validation en utilisant le SIF médian optimisé ou non. Deux procédures d'optimisation ont été testées : soit en utilisant une note précise de l'évaluation par l'expert, ou soit une note imprécise. Chacune des deux procédures d'optimisation améliorent les performances du SIF initialement construit. Les paramètres du SIF sont optimisés suivant les jeux de données servant spécifiquement à l'optimisation. En comparaison avec les performances indiquées dans le tableau 16, prenant en compte les soixante-dix-huit parcelles, les performances moyennes du SIF non optimisé sont plus faibles pour les dix jeux de données de validation, comprenant vingt-trois parcelles, (avec un RMSE de 0.67) mais restent satisfaisantes. Le gain de performance le plus élevé correspond à la procédure d'optimisation utilisant une note précise (tableau 18).

Tableau 18 : Performances moyennes du système avant et après optimisation, sur les données de validation (10 jeux de données de 23 parcelles)

Indices	SIF initial non optimisé	SIF optimisé avec une note précise	SIF optimisé avec une note imprécise
RMSE	0.67	0.53 (-21%)	0.64 (-5%)
r2	0.62	0.76 (+23%)	0.66 (+6%)

Les paramètres des partitions ont été définis suivant la méthode présentée section 4.3. de cette partie et ont été comparés avant et après optimisation.

Après l'optimisation, utilisant une valeur de sortie nette et en tenant compte d'une précision de +/- 0.1 , les paramètres C_2 et C_3 de VIG_MIL sont identiques. Ainsi, il n'y a pas de transition progressive entre un niveau moyen de VIG_MIL et un niveau élevé, ce qui limite alors l'intérêt des ensembles flous, une transition progressive entre les niveaux n'étant plus présente. L'échelle de VIG_MIL varie entre 1 et 3, ce qui signifie que la moitié de l'échelle de cette variable (VIG_MIL > 2.1) est considérée comme un niveau élevé de vigueur liée aux facteurs du milieu. La procédure d'optimisation utilisant une note imprécise permet d'éliminer la forte proximité entre les deux paramètres C_2 et C_3 et de conserver donc l'intérêt du partitionnement flou des variables qui permet de passer progressivement d'une classe à l'autre (Tableau 19, Figure 20).

Tableau 19 : Paramètres des partitions de VIG_MIL (vigueur liée aux facteurs du milieu) pour le système d'inférence floue (SIF) initial non optimisé, optimisé avec une sortie nette ou avec une sortie floue.

Paramètres des partitions	SIF non optimisé	SIF optimisé avec une note précise	SIF optimisé avec une note imprécise
C_1	1.4	1.4	1.4
C_2	2.0	2.1	2.1
C_3	2.8	2.1	2.3

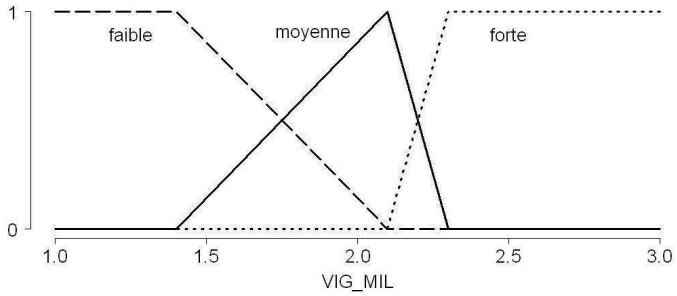


Figure 20 : Partitionnement flou de VIG_MIL (vigueur liée aux facteurs du milieu) selon trois partitions. En abscisse les valeurs prises par VIG_MIL, en ordonné le degré d'appartenance aux ensembles flous.

Les paramètres des partitions de VIG_PG correspondent aux valeurs discrètes et ne varient donc que très peu avant et après optimisation (Tableau 20, Figure 21).

Tableau 20 : Paramètres des partitions de VIG_PG (vigueur conférée par le porte-greffe) pour le système d'inférence floue (SIF) initial non optimisé, optimisé avec une sortie nette ou avec une sortie floue.

Paramètres des partitions	SIF non optimisé	SIF optimisé avec une note précise	SIF optimisé avec une note imprécise
C_1	1.5	1.5	1.5
C_2	2.0	2.1	2.1
C_3	2.5	2.5	2.5
C_4	3.0	3.0	3.0

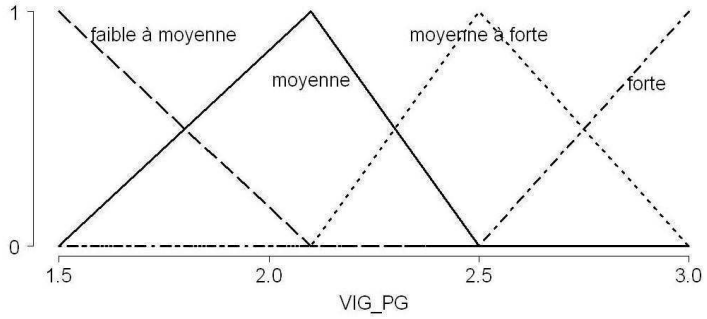


Figure 21 : Partitionnement flou de VIG_PG (vigueur conférée par le porte-greffe) selon quatre partitions. En abscisse les valeurs prises par VIG_PG, en ordonné le degré d'appartenance aux ensembles flous.

Même si VIG_C est une variable discrète, étant donné le nombre de valeurs élevées, comme pour VIG_MIL, l'optimisation a permis de préciser la valeur des paramètres des partitions (Tableau 21, Figure 22).

Tableau 21 : Paramètres des partitions de VIG_C (contrainte sur la vigueur exercée par le mode d'entretien du sol) pour le système d'inférence floue (SIF) non optimisé, optimisé avec une sortie nette ou avec une sortie floue.

Paramètres des partitions	SIF non optimisé	SIF optimisé avec une note précise	SIF optimisé avec une note imprécise
C_1	1.00	1.02	0.86
C_2	1.65	1.50	1.50
C_3	2.25	2.18	2.33

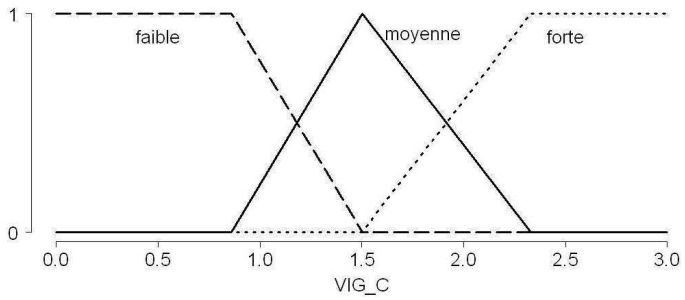


Figure 22 : Partitionnement flou de VIG_C (contrainte sur la vigueur exercée par le mode d'entretien du sol) selon trois partitions. En abscisse les valeurs prises par VIG_C, en ordonné le degré d'appartenance aux ensembles flous.

En utilisant une note imprécise pour optimiser le système, le gain de performance (écart entre le RMSE du SIF initial non optimisé et celui du SIF optimisé ; le RMSE étant pour rappel calculé en comparant la valeur prédite pas le SIF et la valeur réellement observée sur un jeu de

donnée de validation indépendant de celui qui a servi à optimiser le SIF) a été plus faible qu'avec une note précise. Toutefois, grâce à un maintien des transitions progressives entre les labels linguistiques des variables (par exemple de 'Faible' à 'Fort'), nous avons pu conserver la stabilité caractérisant un système d'inférence floue.

D'après la méthode 'Hierarchical Fuzzy Partitioning' (HFP), la variable VIG_MIL a été partitionnée en trois ensembles flous, VIG_PG en quatre et VIG_C en trois. En combinant ces ensembles flous, il y avait donc 3 x 4 x 3 = 36 règles théoriques. Dix-neuf règles ont été effectivement conservées d'après la méthode utilisant le 'Fast Prototyping Algorithm' (FPA) (Tableau 22). Certaines combinaisons n'existent pas dans le jeu de données initial. Tous les ensembles flous de VIG_MIL et VIG_C sont représentés, par contre l'ensemble flou de VIG_PG qui correspond à une très faible vigueur conférée par le porte-greffe n'est pas présent.

Les valeurs de sortie des règles sont indiquées dans le tableau 22. En utilisant la procédure d'optimisation avec une sortie floue, toute l'échelle de VIG_OBS est prédite. La règle 3 a une valeur de sortie égale à 1 contrairement au SIF non optimisé ou optimisé avec une valeur nette. Les valeurs de sortie des règles de la procédure d'optimisation utilisant une valeur de sortie floue sont plus proches des valeurs du SIF non optimisé que celles de l'autre procédure d'optimisation, ce qui peut expliquer les gains moins importants de performance du système (Tableau 22).

Chaque règle de décision est activée par différents exemples (parcelles). Certaines règles sont activées par un nombre important d'exemples (comme les règles 1, 3 et 4). D'autres règles ne sont activées que par un ou quelques exemples (comme les règles 16, 17 et 19). Toutefois, la procédure d'optimisation utilisant une valeur de sortie floue augmente le nombre d'exemples qui activent chaque règle (hormis pour les règles 15 et 18). Cette augmentation est due au changement de la valeur nette de VIG_OBS en valeur floue. Pour mener une analyse complète, nous n'avons pas exclu les règles avec peu d'exemples. Ce déséquilibre reflète les combinaisons réelles présentes dans le jeu de données.

Certaines situations, par exemple des combinaisons avec un porte-greffe conférant une très faible vigueur, ne sont pas représentées. Ces situations ont été éliminées lors de l'étape de sélection des données. Seulement quatre parcelles ont ce type de porte-greffe dans le jeu de données initial. Hammel II et Sudkamp (1998) soulignent que la base de règles peut être incomplète en utilisant une sélection de données pour les apprentissages automatiques, les règles n'étant pas construites pour toutes les combinaisons possibles mais pour les combinaisons présentes dans le jeu de données utilisé pour les apprentissages. Les quatre parcelles avec une très faible vigueur conférée par le porte-greffe sont présentes dans le groupe #3 (tableau 17) et elles sont associées à une forte vigueur conférée par les facteurs du milieu (variable VIG_MIL), ce qui correspond à une adaptation effective du choix du porte-greffe aux facteurs du milieu par le viticulteur.

Tableau 22 : Valeurs de sortie des règles combinant les trois variables d'entrée VIG_MIL, VIG_PG et VIG_C et nombre de parcelles activant chaque règle de décision. Fa: faible, M : moyenne, Fo: forte, Tfo : très forte.

Variables d'entrée				Valeur pour VIG_OBS			Nombre de parcelles qui activent chaque règle	
Règles	VIG_MIL	VIG_PG	VIG_IC	SIF non optimisé	SIF optimisé avec une note précise	SIF optimisé avec une note imprécise	SIF optimisé avec une note précise	SIF optimisé avec une note imprécise
1	M	Fa à M	Fo	2,6	2,1	2,5	28	36
2	Fa	Fo	M	3,7	4,0	3,6	14	33
3	Fa	Fa à M	Fo	1,3	1,2	1,0	38	41
4	Fa	Fa à M	M	1,2	1,3	1,1	26	40
5	M	Fa à M	M	2,5	2,4	2,5	19	36
6	Fa	Fo	Fo	3,5	3,8	3,6	15	25
7	Fo	Fa à M	Fo	4,0	4,0	3,9	19	23
8	M	Fo	M	2,7	1,4	2,9	10	34
9	M	Fo	Fo	2,7	1,1	2,3	10	27
10	Fa	Fo	Fa	2,5	2,2	2,4	7	9
11	Fo	Fo	M	3,0	2,9	3,1	7	22
12	M	Fo	Fa	3,3	3,2	3,3	6	8
13	Fo	Fo	Fo	3,0	2,9	3,1	9	19
14	Fo	Fa à M	M	4,0	4,0	4,0	13	26
15	Fa	Fa à M	Fa	3,2	3,8	3,7	10	4
16	Fa	TFo	M	4,0	3,9	3,9	2	6
17	Fo	Fa à M	Fa	4,0	3,9	3,8	3	8
18	M	Fa à M	Fa	2,7	2,5	2,8	8	5
19	Fo	Fo	Fa	3,5	4,0	3,5	1	4

Les performances du système, construit grâce au jeu de données D3 (soixante-dix-huit parcelles), et ensuite optimisé, sont satisfaisantes. Nous avons testé les SIF optimisés sur un plus grand nombre de parcelles en ajoutant aux sept groupes : #1, #4, #5, #9, #10, #15, #16; quatre groupes : #12, #13, #14, #19 (les groupes qui ajoutés individuellement diminuaient le moins les performances); deux groupes: #2, #6 puis deux autres groupes : #7, #8. Les performances du système restent bonnes pour une augmentation du nombre de parcelles de 16% (de 78 à 102 parcelles, soit 24 parcelles supplémentaires) (Figure 23).

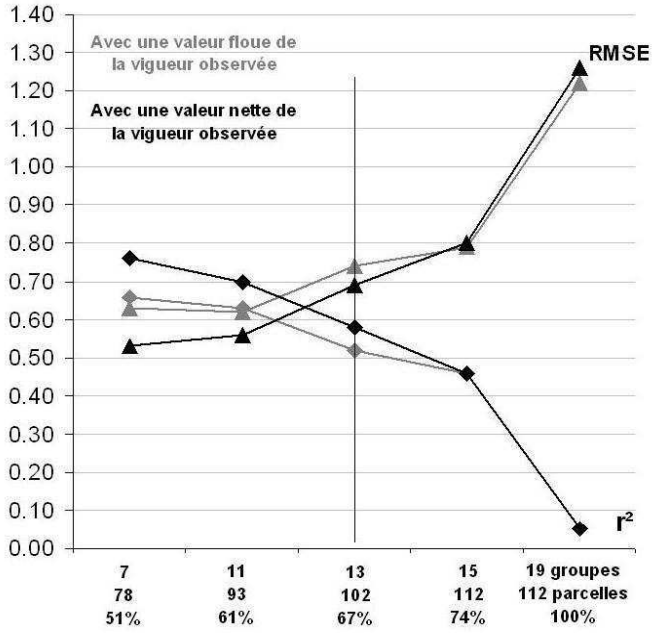


Figure 23 : Performance du système d'inférence floue (SIF) sur un jeu de donnée élargi. Les 78 parcelles correspondent au jeu de donnée D3 ayant servi à construire le SIF.

Ces vingt-quatre parcelles supplémentaires constituent un jeu de données complètement indépendant. De cette façon, le modèle construit a pu être validé sur un plus grand nombre de parcelles. Ce qui confirme ses performances et l'intérêt de la méthode pour extraire des relations à partir de données observées. Le modèle fonctionne correctement pour 67% des parcelles du jeu de données initial (cent-deux parcelles); les 33 % de parcelles mal modélisées peuvent correspondre à des parcelles où le niveau de vigueur est influencé par des facteurs non pris en compte, notamment les effets de la fertilisation ou dont les combinaisons ne sont pas représentées dans le système.

7. Analyse du fonctionnement du système d'inférence floue

Le système d'inférence floue (SIF) construit à partir de la méthode exposée est performant (section 6.), ainsi son fonctionnement peut être interprété par les agronomes.

L'analyse des règles montre une adaptation ou non des pratiques culturales aux facteurs du milieu. Par exemple, pour les règles 11, 13 et 19 (Tableau 22), des parcelles avec des facteurs du milieu qui entraînent une forte vigueur présentent en plus un porte-greffe qui confère aussi une forte vigueur, ce qui témoigne d'un mauvais choix de porte-greffe. Goulet et Morlat (2010) ont noté que les pratiques déjà en place sur un vignoble ne sont pas toujours bien adaptées aux facteurs du milieu. Ces auteurs indiquent que pour le vignoble de la Sarthe, en moyenne Vallée de la Loire, 72 % des parcelles ont un porte-greffe trop vigoureux alors que les facteurs du milieu induisent déjà une forte vigueur. Les combinaisons présentes dans un vignoble reflètent différents niveaux d'adaptation des pratiques suivant les facteurs du milieu.

Pour la zone d'étude du Saumurois, seulement 11 % des parcelles activent ces règles, l'adaptation semble meilleure. Il faut toutefois préciser que seules des parcelles de viticulteurs coopérateurs ont été prises en compte. Ces viticulteurs bénéficient d'un appui technique du personnel de la cave coopérative. Cela peut expliquer que notre jeu de donnée présente moins de combinaisons de variables liées à une mauvaise adaptation des pratiques. Si la méthode que nous avons utilisée était appliquée au vignoble de la Sarthe, par exemple, il y aura plus de parcelles qui activeraient des règles correspondant à des combinaisons révélant ces mauvaises adaptations des pratiques.

Une mauvaise adaptation des pratiques dans un vignoble (un porte-greffe conférant une forte vigueur planté sur une parcelle aux facteurs du milieux induisant également une forte vigueur ou inversement un porte-greffe conférant une faible vigueur planté sur une parcelle aux facteurs du milieux induisant également une faible vigueur) entraîne une plus large gamme de variation de la vigueur au sein de celui-ci. Une large gamme de situations doit être prise en compte pour assurer la généricité du modèle construit afin qu'il soit applicable à de nombreuses parcelles. Il faut ainsi être vigilant et ne pas prendre en compte que des combinaisons qui témoignent d'une bonne adaptation des pratiques.

Nous avons étudié le comportement du modèle construit à partir du SIF, en prenant en compte quatre combinaisons. Nous avons considéré deux niveaux de vigueur conférée par le porte-greffe : 'Faible à Moyenne' (1.5) et 'Très Forte' (3) ainsi que deux niveaux de concurrence due à l'entretien du sol : 'Aucune' (0) ou 'Forte' (2.75).

Nous avons, tout d'abord, comparé le fonctionnement du système optimisé en utilisant une note précise ou imprécise comme donnée d'apprentissage (Figure 24). La variation de la vigueur prédite (que nous appelons réponse du système), en fonction des variables d'entrée, n'est pas toujours linéaire, en utilisant une donnée d'apprentissage imprécise (graphique de droite Figure 24). Il s'agit d'une caractéristique de la modélisation obtenue en utilisant des ensembles flous. Le système d'inférence floue semble plus précis : lorsque les facteurs du milieu induisent une forte vigueur, les combinaisons avec une absence de concurrence de l'entretien du sol ont des valeurs de vigueur prédites plus faibles que les combinaisons avec un entretien du sol induisant une forte concurrence. Les tendances que nous analysons ensuite sont toutefois similaires.

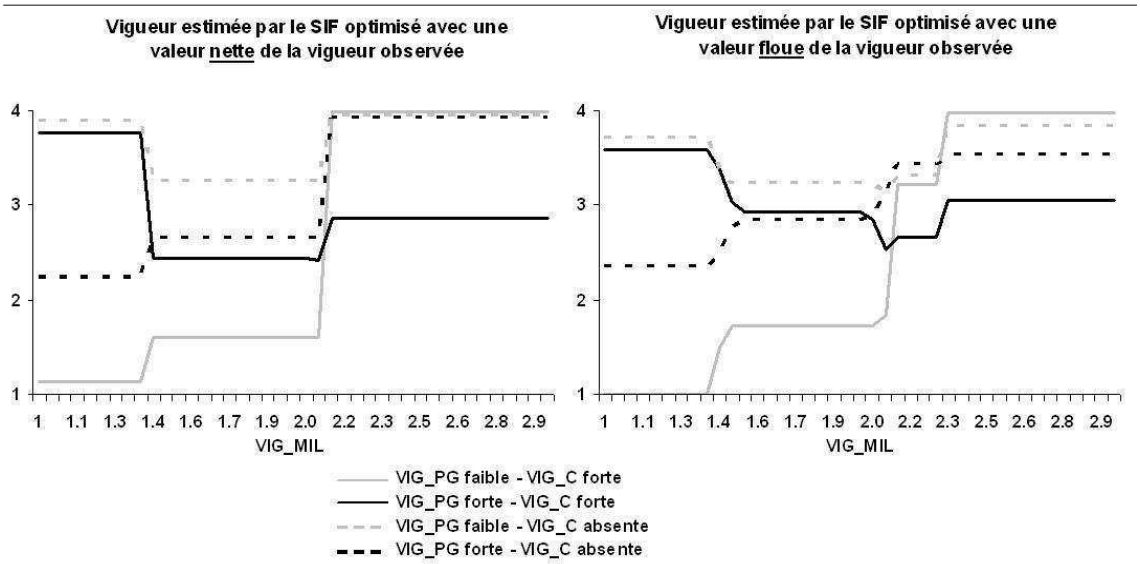


Figure 24 : Evolution de la vigueur prédite selon les systèmes d'inférence floue optimisés avec, soit une valeur nette de la vigueur observée, soit une valeur floue. Ceci, en fonction des trois variables d'entrée : la vigueur liée aux facteurs du milieu VIG_MIL (représentée en abscisse), la vigueur conférée par le porte-greffe VIG_PG et la concurrence de l'entretien du sol sur la vigueur VIG_C.

En étudiant la réponse de la variable de sortie aux fluctuations des variables d'entrée, l'évaluation du fonctionnement du SIF révèle différents types de relations :

- Des relations directes qui ne nécessitent pas d'interprétation car elles sont déjà connues.
- Des relations qui apparaissent en contradiction avec les connaissances actuelles empiriques ou scientifiques. Toutefois, elles apportent des informations intéressantes concernant l'évaluation des interactions entre les variables.

  Les mêmes observations ont été mentionnées par Delgado et al. (2009) au cours de l'étude de la production d'olives, une autre culture pérenne.

Concernant les relations qui ne nécessitent pas d'interprétation, nous pouvons mentionner l'effet de la variable VIG_C caractérisant la concurrence de l'entretien du sol. Lorsque les parcelles ne sont pas enherbées, c'est à dire qu'aucune concurrence n'existe pour la vigne (ensemble 'Faible', règles 10, 12, 15, 17, 18 et 19), leur vigueur simulée est toujours supérieure à 2, contrairement aux parcelles enherbées (Tableau 22, courbes en pointillés Figure 24). L'impact d'un couvert végétal sur l'inter-rang de vigne a été montré et démontré dans la littérature, il entraîne des compétitions vis à vis de l'alimentation hydrique et azotée. Ces compétitions diminuent le développement de la vigne au cours du millésime mais aussi son potentiel de développement, soit le potentiel de vigueur pour les années suivantes, consécutivement à une baisse des réserves d'azote dans les parties pérennes de la vigne (Celette et al. 2009).

L'étude de l'impact du porte-greffe combiné aux autres variables, nécessite une analyse plus approfondie pour évaluer les interactions entre les variables.

Prenons le cas d'une absence d'enherbement, c'est à dire avec une absence de concurrence exercée sur la vigne (ensemble flou 'Contrainte Faible' de la variable VIG_C) et d'une vigueur conférée par le sol faible (ensemble flou 'Vigueur Faible' de la variable VIG_MIL) ; les parcelles plantées avec des porte-greffes faiblement vigoureux (ensemble flou 'vigueur Faible à Moyenne', règles 15, 17 et 18 du tableau 22, courbes en trait pointillé grises Figure 24) ont des niveaux de vigueur prédits, en lien avec les niveaux de vigueur observés ayant eu le rôle de données d'apprentissage, plus forts que celles plantées avec des porte-greffes fortement vigoureux (ensemble flou 'vigueur Forte' de la variable VIG_PG, règles 10, 12 et 19 du tableau 22, courbes en trait pointillé noires Figure 24).

Ces résultats ont été présentés aux techniciens de la cave coopérative. Ils ne les ont pas trouvés étonnants en expliquant que les viticulteurs ont tendance à fertiliser fortement les parcelles pour lesquelles ils savent qu'ils sont en présence de facteurs qui induisent un faible potentiel de vigueur. En absence d'une culture dans l'inter-rang, qui pourrait prélever une partie de cette fertilisation, nous supposons que l'effet est d'autant plus marqué, une plus grande quantité de fertilisant étant disponible pour les racines des horizons superficiels, ce qui augmenterait de manière importante la vigueur.

Néanmoins, lorsque les facteurs du milieu induisent une forte vigueur (valeurs supérieures à 2.1) et toujours dans le cas d'une absence de contrainte de l'entretien du sol, l'effet du porte-greffe est réduit. Nous pouvons en conclure que, dans le cas de l'absence d'une couverture herbacée, les facteurs du milieu ont alors plus de poids que le porte-greffe.

Intéressons-nous maintenant aux parcelles enherbées présentant une ou plusieurs plantes d'enherbement ayant un fort potentiel de concurrence (courbes en trait plein, figure 24). Lorsque les facteurs du milieu induisent une vigueur faible à moyenne (VIG_MIL < 2), la vigueur simulée est cohérente avec la connaissance empirique : un porte-greffe qui confère une faible vigueur est associé à une faible vigueur simulée. Plus les facteurs du milieu induisent une vigueur faible, plus la différence entre porte-greffes est importante. Par contre, lorsque les facteurs du milieu induisent une plus forte vigueur (VIG_MIL > 2), ce qui est le cas notamment des sols profonds, un porte-greffe qui confère une plus faible vigueur est associé à un plus fort niveau de vigueur simulé. Nous pouvons expliquer cette relation grâce à la connaissance des caractéristiques des porte-greffes.

Nous avons uniquement considéré dans notre travail le niveau de vigueur induit par le porte-greffe, toutefois les porte-greffes présentent des distributions racinaires différentes. Cela explique en partie le niveau de vigueur. Un système racinaire peu dense est superficiel est associé à une vigueur induite plus faible.

Peu d'étude ont comparé l'enracinement de différents porte-greffes. A notre

connaissance nous ne pouvons citer que les travaux de Barbeau et al. (2006). Les travaux très anciens menés sur les porte-greffes n'ont jamais été publiés. Les différences d'enracinement entre le porte-greffe Riparia et le SO4 sont toutefois très connues dans la profession viticole. Ces auteurs ont étudié l'effet conjoint du porte-greffe et du mode d'entretien du sol sur l'expression végétative du Cabernet franc, dans un sol profond. Ils ont observé sur des fosses pédologiques que le développement racinaire du Riparia (porte-greffe qui induit une faible vigueur) est limité aux horizons superficiels du sol alors que l'enracinement du SO4 (porte-greffe qui induit une vigueur beaucoup plus forte) est beaucoup plus profond. Le porte-greffe Riparia, qui confère une très faible vigueur n'est pas présent dans la base de donné utilisée dans cette étude, le porte-greffe le moins vigoureux majoritairement présent sur la zone d'étude est le 101-14. Le porte-greffe 101-14 a toutefois d'après (Institut Français de la Vigne et du Vin et al. 2007) un système racinaire ramifié, comparable au Riparia.

Lors de travaux pour caractériser l'effet de l'enherbement sur le sol, la vigne et le vin, (Morlat et Jacquet 2003) signalent que le profil racinaire est modifié par la présence d'un enherbement : la densité racinaire de surface diminue et des racines colonisent les horizons plus profonds du sol. Ces observations ont également été effectuées pour un sol profond. Par contre, dans le cas de cultures associées arbres – maïs, Odhiambo et al. (2001) signalent que pour des sols superficiels la présence d'une culture annuelle (le maïs) induit une diminution de la densité racinaire de la plantation pérenne (les arbres), sans que l'enracinement puisse se développer en profondeur pour compenser ; contrairement donc à ce qu'avaient pu signaler (Morlat et Jacquet, 2003) et d'autres auteurs (Howard, 1925 ; Eastham et Rose, 1990 ; Schroth, 1995 ; in Odhiambo et al., 2001) dans le cas de cultures associées sur des sols profonds.

Planté sur un sol qui induit une faible vigueur (VIG_MIL < 2), c'est à dire plus particulièrement un sol peu profond avec un enherbement, un porte-greffe qui confère une faible vigueur a alors son développement fortement limité, aucun développement racinaire en profondeur pour compenser n'étant possible. Ceci explique la vigueur beaucoup plus faible prédite pour le porte-greffe qui confère une faible vigueur, dans le cas d'un sol qui induit également une faible vigueur.

Dans le cas d'un sol plus profond, qui induirait une vigueur plus forte, le système racinaire du porte-greffe peut se développer plus en profondeur pour compenser la concurrence de l'enherbement en surface. Cela explique les niveaux de vigueur élevés. Cependant cela ne permet pas d'expliquer pourquoi le porte-greffe faiblement vigoureux présente un niveau de vigueur supérieur au porte-greffe fortement vigoureux.

Une autre caractéristique des porte-greffes concerne leur sensibilité plus ou moins importante à la sécheresse et à l'humidité. Des travaux récents montrent que certains porte-greffes sont plus efficaces pour extraire l'eau du sol, indépendamment de leur effet sur la vigueur conférée au cépage (Marguerit et al. 2011). Lors du choix du porte-greffe, plusieurs critères doivent être pris en compte en tenant compte des caractéristiques des facteurs du

milieu : le niveau de vigueur induit par le sol et le sous-sol, le risque de sécheresse ou au contraire de saturation en eau du sol et le taux de calcaire actif dans le sol. L'adaptation du SO4 (porte-greffe conférant une vigueur forte) à l'humidité est faible à moyenne contrairement au 101-14 (porte-greffe conférant une vigueur faible). Ainsi dans le cas des sols induisant une forte vigueur, étant donné notamment une forte réserve en eau, le porte-greffe de type 101-14 serait mieux adapté, ce qui pourrait induire une plus forte vigueur.

Les relations entre les variables, que nous avons mis en évidence, doivent être confirmées sur une autre base de données, toutefois, la méthode utilisée nous a permis de mettre en évidence des interactions entre les facteurs du milieu, le porte-greffe et l'entretien du sol, en lien avec les connaissances issues de la bibliographie.

8. Conclusion

La méthode d'analyse de données développée dans la seconde partie de ce chapitre est une approche facile à mettre en œuvre et transparente, chaque étape peut être contrôlée. Elle permet d'extraire de la connaissance d'un jeu de données et d'étudier les relations complexes entre les facteurs du milieu, les pratiques des viticulteurs et la vigueur de la vigne, ceci à partir de données issues d'observations réalisées sur le vignoble.

En permettant de prédire le niveau de vigueur, ce travail contribue à mieux adapter les cartes 'conseil', construites lors des études de terroirs dans les vignobles. Cette carte permet d'optimiser le choix de certaines pratiques comme le porte-greffe retenu à la plantation ou le mode d'entretien du sol. Les résultats montrent des interactions entre les variables. Certaines relations à première vue incohérentes avec la connaissance experte sont dues à des interactions entre les pratiques et les facteurs du milieu et entre les pratiques elles-mêmes. Par conséquent, un système expert simple, basé uniquement sur une connaissance experte et des relations directes entre variables ne peut pas être performant pour évaluer le niveau de vigueur, lorsque l'ensemble des facteurs sont pris en compte.

Les caractéristiques du jeu de données d'apprentissage, sélectionné pour construire le système d'inférence floue, influencent l'analyse du fonctionnement du système par l'agronome. Nous avons proposé une méthode pour sélectionner les données agronomiques dans le but d'étudier les interactions entre les variables du système retenues, mais en excluant, toutefois, des parcelles aux combinaisons peu rencontrées dans le vignoble.

Les systèmes d'inférence floue permettent de prendre en compte l'incertitude sur les données, grâce à une transition progressive entre les classes. Ce travail souligne aussi la nécessité de développer de nouvelles méthodologies pour prendre en considération l'incertitude sur la variable de sortie qui est utilisée comme donnée d'apprentissage au cours du processus de construction du système. Nous avons testé un nouvel indice de performance pour optimiser les systèmes d'inférence floue construits. Il utilise une variable de sortie floue comme donnée d'apprentissage, soit une valeur floue de l'évaluation de l'expert. En utilisant ce nouvel indice,

les paramètres du système sont ainsi optimisés en prenant en compte l'incertitude qui existe sur les données d'apprentissage. Même si le gain de performances est supérieur en utilisant une variable de sortie nette, c'est à dire sans prendre en compte l'incertitude, le système optimisé avec une variable de sortie floue a montré des avantages : il conserve la transition progressive entre les ensembles flous d'une variable d'entrée, la variation de la variable de sortie est plus progressive et le système est plus précis.

Nous avons considéré les variables d'entrée les plus influentes sur la zone d'étude, d'autres variables, qui ont aussi un effet sur le fonctionnement de la vigne, n'étaient pas fixées. La fertilité du sol n'a pas été abordée, mais son impact peut expliquer certains résultats obtenus. De prochains travaux, suite à ce travail de thèse, pourraient intégrer l'impact de la fertilisation. Si cette pratique n'est pas optimisée, elle peut influencer significativement le niveau de vigueur de la vigne.

Il faut aussi préciser que nous n'avons pas pris en compte l'impact de la densité de plantation sur le niveau de vigueur de la vigne, cette pratique étant fixée par les cahiers des charges des appellations sur la zone d'étude.

La méthodologie que nous avons appliquée à la vigne est générique. Néanmoins, les résultats obtenus avec les systèmes d'inférence floue construits dépendent des caractéristiques de la zone d'étude. Une perspective intéressante consisterait à tester cette méthode sur d'autres vignobles avec des pratiques mises en œuvre différentes, ce qui permettrait par exemple de prendre en compte l'effet de la densité de plantation. Ensuite, les résultats pourraient être soumis à un groupe d'expert (viticulteurs, techniciens, chercheurs) pour être validés.

En conclusion, trouver une méthode de synthèse consolidée par son application à différentes zones d'étude, couplée à une validation par expertise, est un travail de recherche indispensable pour construire un outil d'aide à la décision permettant d'optimiser le choix des pratiques à l'échelle de la parcelle.

Partie 3. Itinéraires de fonctionnement et typologie 'produit raisin/vin'

Partie3. Itinéraires de fonctionnement et typologie 'produit raisin/vin'

Notre objectif général consiste à construire une méthode innovante de caractérisation systémique du fonctionnement de la vigne à partir des effets combinés du milieu et des pratiques pour prévoir les types de 'produit raisin/vin'. Tel que nous l'avons définie, dans le premier chapitre du manuscrit, l'appartenance des raisins, au moment de la vendange, à un même type, implique les mêmes ajustements éventuels de pratiques culturales en lien avec les caractéristiques des facteurs du milieu, le même niveau d'adaptation à une catégorie de vin donnée et un même itinéraire de vinification. Lorsque l'un de ces éléments varie, de façon significative, le type change.

La qualité du raisin peut être définie par de nombreux critères. Ces critères évaluent la maturité technologique (concentration en sucres, taux d'acidité totale et pH), la maturité aromatique, la maturité phénolique (nature et concentration en composés phénoliques) et la maturité texturale (Ribéreau-Gayon et al. 2004a; Ribéreau-Gayon et al. 2004b; Maury et al. 2008). La composition du raisin conditionne significativement les propriétés sensorielles du vin. Ces dernières dépendent aussi des pratiques œnologiques mises en œuvre au cours du processus de vinification. Se pose alors la question de savoir quels types de 'produit raisin/vin' considérer pour notre étude, ceux-ci étant reliés à des itinéraires de fonctionnement de la vigne préalablement identifiés.

La démarche entreprise dans ce travail de thèse doit permettre de construire les bases d'un outil d'aide à la décision pour les professionnels de la filière viticole. Nous avons donc choisi de construire une typologie de produit suivant leur expertise et leur savoir-faire.

Nous avons travaillé à partir de deux postulats :

- Les professionnels de la filière viticole (viticulteurs, techniciens viticoles et œnologues) ont chacun à l'esprit une typologie empirique de leurs produits. Cette typologie détermine le choix de la date de vendange, l'usage des raisins pour différentes cuvées, la rémunération du raisin dans le cas des caves coopératives ou l'évolution des pratiques viticoles et œnologiques.
- Pour définir des types de 'produit raisin/vin', plusieurs critères caractérisant le raisin et le vin peuvent être combinés et hiérarchisés, certains sont discriminants.

Nous émettons l'hypothèse suivante : des types de 'produit raisin/vin' peuvent être prédits en fonction d'itinéraires de fonctionnement préalablement identifiés.

Pour tester cette hypothèse, nous proposons d'appliquer le concept d'itinéraire de fonctionnement à des parcelles d'étude et ensuite de le mettre en relation avec les types de produits raisin/vin pouvant en découler. Pour cela, deux résultats intermédiaires ont été nécessaires : i. la construction d'une typologie par expertise de professionnels et ii. la caractérisation de la variabilité inter-annuelle des années climatiques pour le vignoble de la moyenne vallée de la Loire, afin de prendre en compte des parcelles suivies lors d'années

marquées sur le plan climatique. Les résultats de la typologie par expertise sont présentés en détail dans la partie 2. de ce chapitre. La caractérisation de la variabilité climatique inter-annuelle en moyenne vallée de la Loire (Coulon et al. 2011) est présentée en annexe 1.

Étant données les caractéristiques des millésimes identifiées lors de notre étude préliminaire (Coulon et al. 2011) et les informations disponibles dans les bases de données issues des suivis de parcelles expérimentales par l'INRA-UE1117, nous avons choisi d'appliquer la typologie 'produit raisin/vin' et caractériser le fonctionnement de la vigne à partir des données obtenues en 2002 et 2005, sur quatorze parcelles de Cabernet franc de la moyenne Vallée de la Loire. L'absence de certaines données sensorielles n'a pas permis d'exploiter les données des millésimes 2003 et 2004. Grâce aux résultats intermédiaires concernant la caractérisation des millésimes en moyenne vallée de la Loire (Coulon et al. 2011), nous pouvons affirmer que 2002 et 2005 sont deux années aux conditions climatiques suffisamment différentes pour tester notre hypothèse. 2002 est une année plus fraîche et par conséquent plus tardive que 2005 qui est une année plus chaude est par conséquent plus précoce. De plus, 2005 est le millésime ayant présenté les conditions d'alimentation hydrique les plus limitantes des quinze dernières années alors que 2002 a montré des conditions d'alimentation hydrique beaucoup moins limitantes. Nous avons ainsi pu tester le concept de variabilité de l'itinéraire de fonctionnement suivant les conditions d'alimentation hydrique.

Nous disposions, pour chacune des quatorze parcelles et pour les deux années 2002 et 2005, d'un jeu complet de données concernant la connaissance des facteurs du milieu des parcelles et des pratiques mises en œuvre, le suivi du fonctionnement de la vigne, les caractéristiques des raisins vendangés et deux évaluations sensorielles des vins issus de ces parcelles (par un jury de professionnels et par un jury expert). Nous avons ainsi pu relier le fonctionnement de la vigne à une typologie 'produit raisin/vin'.

Ce chapitre est divisé en trois parties :

- dans un premier temps, nous appliquons le concept d'itinéraire de fonctionnement aux quatorze parcelles d'étude ;
- dans un second temps, nous construisons une typologie 'produit raisin/vin', par expertise de professionnels, pour l'appliquer ensuite aux quatorze parcelles d'étude
- dans un troisième temps, nous analysons les relations entre les itinéraires de fonctionnement et les types de 'produit raisin/vin' identifiés.

Chapitre1. Identification d'itinéraires de fonctionnement

1. Facteurs du milieu et pratiques mises en œuvre sur les parcelles d'étude

Les parcelles sont localisées sur les vignobles d'AOC de Saumur, Saumur-Champigny, Bourgueil, Saint-Nicolas de Bourgueil et Chinon (Figure 25). Elles sont réparties sur cinq Unités Terroir de Base qui sont majoritaires de cette zone d'étude :

- des craies sablo-limono-glauconieuses et micacées (cailloux de craie et rognons siliceux) du Turonien moyen (3 parcelles : CYR1, SOU1 et RES2) ;
- des argiles à silex du Sénonien (3 parcelles : LAR2, LAR1 et CHI1) ;
- des sables à sables argileux du Sénonien (3 parcelles : SOU2, PAR1 et SNB2) ;
- des alluvions de la Loire du Quaternaire (3 parcelles : SNB1, SAV1 et RES1)
- des alluvions de la Vienne du Quaternaire (2 parcelles : CHI2 et CHI3).

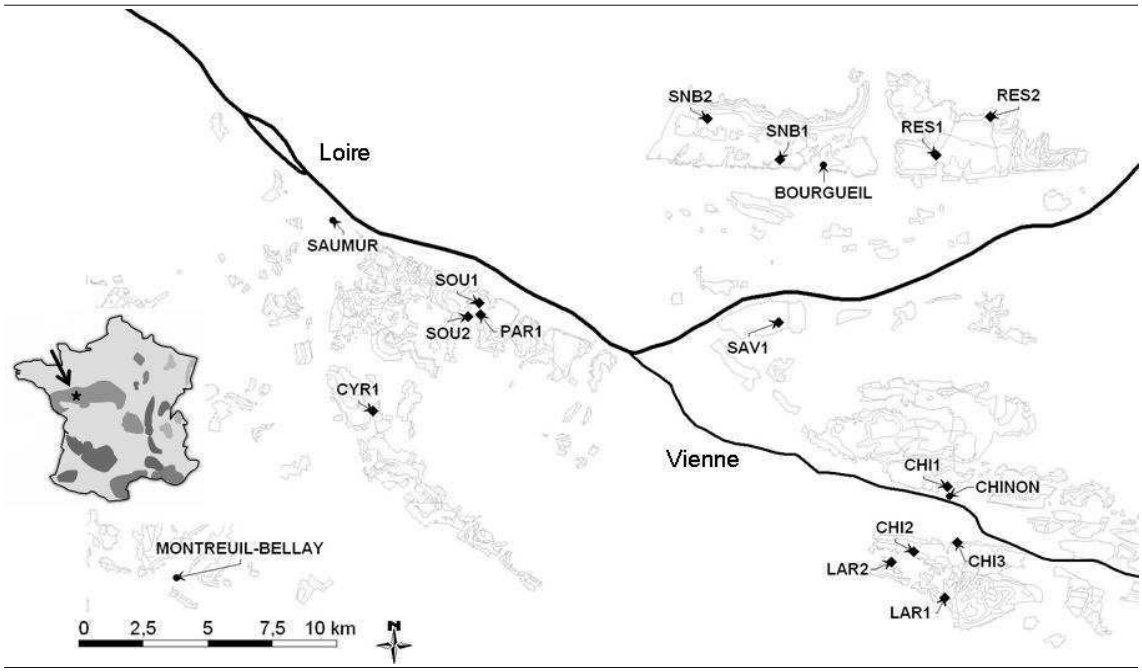


Figure 25 : Localisation des quatorze parcelles d'étude. Les délimitations des zones en Appellation d'Origine Contrôlée sont représentées en grisé.

Toutes les parcelles étaient plantées avec le clone 210 du cépage Cabernet franc greffé sur le porte-greffe 3309C. Ce matériel végétal est celui le plus fréquemment utilisé sur la zone d'étude. Il faut noter que le clone 210 du Cabernet franc a un rendement supérieur aux autres clones disponibles (Institut Français de la Vigne et du Vin et al. 2007). Avec une bonne maîtrise des rendements, il permet toutefois de produire des vins de qualité. Les vignes avaient en moyenne une quinzaine d'années, ce qui permet de penser que l'enracinement avait déjà colonisé la majeure partie du volume souterrain.

Les profils pédologiques et racinaires sont présentés en annexes 2 et 3.

Sur le plan du protocole, l'INRA-UE1117 avait délimité dans des vignes appartenant à

des vignerons, une parcelle élémentaire de cent ceps, parmi lesquels trente d'entre-eux étaient choisis pour les diverses mesures et observations.

Les parcelles des vignerons étaient enherbées ou non. L'enherbement avait été maintenu pour les parcelles élémentaires sur craie du Turonien moyen car les vignerons enherbent très fréquemment ce type de milieu. Deux parcelles élémentaires (SNB1 et CHI1) étaient enherbées depuis plusieurs années et ont été désherbées en 2002. Les autres parcelles étaient soit désherbées, soit présentaient un enherbement implanté l'année précédent le début des suivis.

Les parcelles étaient toutes taillées, mi-janvier, en Guyot simple (taille majoritaire de la zone) en laissant une charge de dix bourgeons par cep (six à huit bourgeons sur le rameau principal et deux sur le courson de rappel). Un épamprage était réalisé mi-mai pour supprimer les contre-bourgeons et maintenir dix rameaux fructifères. Un effeuillage manuel était mis en œuvre sur la face la plus à l'est, au stade 'petits pois' pour aérer les ceps et éclairer les grappes. La hauteur et la largeur des rognages ainsi que leur fréquence étaient gérées par le vigneron exploitant la parcelle ; les vignerons avaient toutefois des pratiques similaires. Les densités de plantation étaient comparables, variant entre 4762 et 5013 ceps par hectare.

La date de récolte était décidée en fonction du niveau de maturité technologique des parcelles (teneur en sucre et en acidité totale) et de la contrainte imposée par la date de vendange des vignerons. Les parcelles étaient ainsi vendangées à des dates différentes. Trois parcelles élémentaires n'ont pas été récoltées en 2002 (CHI1, CYR1 et LAR1), les parcelles ayant déjà été vendangées par les vignerons.

2. Calcul des variables de fonctionnement des parcelles d'étude

Nous avons calculé, pour chaque parcelle, les variables composites construites au chapitre précédent : la vigueur liée aux facteurs du milieu (VIG_MIL), le pédoclimat thermique (PED), le mésoclimat thermique (MES), la précocité liées aux facteurs du milieu (PRE_MIL) et la vigueur liée aux facteurs du milieu et aux pratiques (VIG_ITK) (Tableau 23). Nous indiquons également, dans ce tableau, les valeurs des réserves utiles maximales en eau (RUM) calculées pour chaque parcelle, suivant la méthode de Goulet et al. (2004). La RUM entre dans le calcul de VIG_MIL et dans celui des bilans hydriques permettant de caractériser l'alimentation en eau de la vigne suivant les sols et les conditions climatiques du millésime.

Les résultats obtenus montrent que 75 % de la gamme de variation de VIG_MIL est représentée par les parcelles d'études. Les valeurs de VIG_MIL s'inscrivent entre une valeur minimale de 1.5 (parcelle LAR2) et une valeur maximale de 3 (parcelles PAR1, SNB1 et SOU2). LAR2 est la parcelle qui a la plus faible RUM (80 mm), toutefois des RUM plus basses existent dans le vignoble. La variable PED présente une large échelle de valeurs sur les parcelles d'étude, avec un minimum de 1.1 et un maximum de 2.9. En revanche, MES varie uniquement entre 2.0 et 2.7. Comme pour VIG_MIL, les valeurs de PRE_MIL des parcelles d'étude ne

couvrent pas toute la gamme de variation possible, avec de faibles valeurs non représentées. Les basses valeurs pour VIG_ITK sont aussi absentes, celles-ci variant de 2 à 3.8 sur une échelle entre 1 et 4. Les valeurs des variables d'entrée de chaque variable composite sont présentées en annexes 4 et 5.

Tableau 23 : Valeurs, pour les 14 parcelles d'étude, des variables composites suivantes : la vigueur liée aux facteurs du milieu (VIG_MIL), le pédoclimat thermique (PED), le mésoclimat thermique (MES), la précocité liée aux facteurs du milieu (PRE_MIL) et la vigueur liée aux facteurs du milieu et aux pratiques (VIG_ITK).

Parcelles	RUM (mm)	VIG_MIL [1;3]	PED [1;3]	MES [1;3]	EAR_MIL [1;3]	VIG_ITK [1;4]
CHI1	156	2.4	1.5	2.0	2.2	3.9
CHI2	124	2.3	2.9	2.7	2.0	3.7
CHI3	192	2.6	2.8	2.7	1.9	3.9
CYR1	103	1.9	2.4	2.7	2.4	2.0
LAR1	131	2.1	1.1	2.0	1.5	2.8
LAR2	85	1.5	1.1	2.3	1.7	3.6
PAR1	188	3.0	2.6	2.3	1.7	3.8
RES1	130	2.2	2.9	2.3	2.2	3.2
RES2	111	2.0	2.0	2.7	1.9	2.2
SAV1	133	2.4	2.9	2.3	1.9	3.8
SNB1	80	2.0	2.9	2.3	2.2	2.9
SNB2	206	3.0	2.1	2.3	2.1	3.8
SOU1	136	2.2	2.4	2.5	2.3	3.0
SOU2	219	3.0	2.6	2.5	2.2	3.8

Bien sûr, les quatorze parcelles d'étude ne présentent pas toute la variabilité pouvant exister suivant le calcul des variables composites construites dans le chapitre précédent. Toutefois, elles montrent une gamme de variation suffisante pour tester, dans de bonnes conditions, l'application du concept d'itinéraire de fonctionnement.

3. Caractérisation des itinéraires de fonctionnement

Selon la définition présentée chapitre 1., l'itinéraire de fonctionnement d'une parcelle est d'abord défini par une valeur origine en termes écophysiologiques, correspondant aux effets de facteurs stables du milieu physique et aux pratiques culturales pérennes appliquées. Ensuite, les conditions climatiques de l'année, induisant notamment des différences d'alimentation en eau de la vigne, créant une diversification plus ou moins importante de l'itinéraire de fonctionnement.

Nous disposions de données écophysiologiques mesurées pour les quatorze parcelles d'étude en 2002 et 2005. Un itinéraire de fonctionnement a ainsi pu être identifié, en fonction de la caractérisation du développement végétatif et reproducteur de la vigne, de sa précocité et de son alimentation hydrique. Les itinéraires de fonctionnement ont ensuite été croisés avec les types de produits raisin/vin définis au préalable.

3.1. Développement végétatif et reproducteur de la vigne

Comme les vignes sont d'âge similaire et sont taillées de la même façon, nous avons pu caractériser précisément la vigueur de chaque parcelle, qui se traduit par différents niveaux de développement végétatif, suivant une mesure du poids de bois de taille sec (Carbonneau et al. 2007). Celui-ci a été ramené au m² pour prendre toutefois en compte les petites différences de densités de plantation. La mesure du poids de bois de taille avait été réalisée sur trente ceps de référence, les cinq ceps ayant les poids de bois de taille frais les plus proches de la moyenne des trente ceps ont été étuvés (72h à 105°c) pour évaluer le pourcentage d'eau moyen contenu dans les sarments et calculer le poids de bois de taille sec. Les résultats montrent que ces derniers varient de 0.08 kg/m² pour SAV1 en 2002 et 2005 à 0.23 kg/m² pour CHI3 en 2005, ce qui représente une large gamme de variation (Figure 26).

Le développement végétatif doit toutefois être considéré en regard de la quantité de fruits produits. De nombreux travaux ont mis en évidence l'influence de l'équilibre entre la surface foliaire et le rendement sur la qualité du raisin et du vin (Dufourcq et al. 2005). Nous disposions de données concernant la surface foliaire exposée potentielle. Cette dernière avait été calculée suivant la méthode de Carbonneau (1983). En fonction de paramètres morphologiques de la végétation, cette méthode permet d'estimer le potentiel de surface foliaire exposée au rayonnement solaire en m² de feuilles par m² de sol, lequel est corrélé positivement à la qualité du raisin (Carbonneau 1983). Il faut noter que, comme attendu, les surfaces foliaires exposées sont fortement corrélées aux poids de bois de taille (coefficient de Pearson de 0.677, P-value <0.0001 et R^2 de 0.46, calculés pour les vingt-huit couples 'parcelle-année'). Des mesures de poids de récolte, exprimés en kg de raisin / m², avaient aussi été effectuées. Les poids de récolte varient de 0.70 kg/m² pour SAV1 en 2005 à 1.43 kg/m² pour SNB2 en 2002 (Figure 26). Les rendements calculés en fonction du poids de récolte, des rendements en jus et des densités de plantation varient ainsi de 44 à 85 hl/ha. Les rendements calculés sont très fortement corrélés aux poids de récolte, étant donnée une faible variabilité entre les rendements en jus et entre les densités de plantation pour les différentes parcelles (coefficient de Pearson de 0.988, P-value <0.0001 et R^2 de 0.98, calculés pour vingt-cinq couples 'parcelle-année', trois parcelles n'ayant pas pu être récoltées en 2002). Il faut noter que certains rendements observés sur les parcelles élémentaires suivies par l'INRA dépassent les rendements visés, inscrits dans les cahiers des charges des AOC (de 55 à 57 hl/ha). La gestion du rendement sur les parcelles expérimentales étant moins sévère que celle que peut mettre en œuvre un vigneron sur une parcelle de Cabernet franc clone 210, clone fortement producteur.

Les valeurs du rapport surface foliaire / poids de récolte varient fortement d'une parcelle à l'autre (Figure 26). Les essais expérimentaux indiquent un optimum à 1.2 m²/kg pouvant aller jusqu'à 1.5 m²/kg pour des vins structurés (Murisier et Zufferey 1997; Dufourcq et Bonisseau 2004; Deloire 2007). Les valeurs de certaines parcelles sont en dessous du seuil de 1.2 m²/kg, en raison de poids de récolte élevés sur les parcelles élémentaires de l'INRA. Étant donné une

bonne gestion du feuillage limitant la pourriture grise et les conditions climatiques favorables, les parcelles ont toutefois pu atteindre une bonne maturité.

Du fait d'écarts très importants entre parcelles pour le poids de récolte, nous avons aussi évalué la puissance de la vigne dans chaque parcelle. La puissance prend en compte, selon (Deloire et al. 2002; Carbonneau et al. 2007), le poids de bois de taille (PBT) et le poids de récolte (PR) : Puissance = 0,5 PBT + 0,2 PR. Les valeurs de puissance permettent de bien traduire le potentiel d'expression végétative combiné à la capacité de production. Les parcelles présentent de forts écarts de puissance (Figure 26).

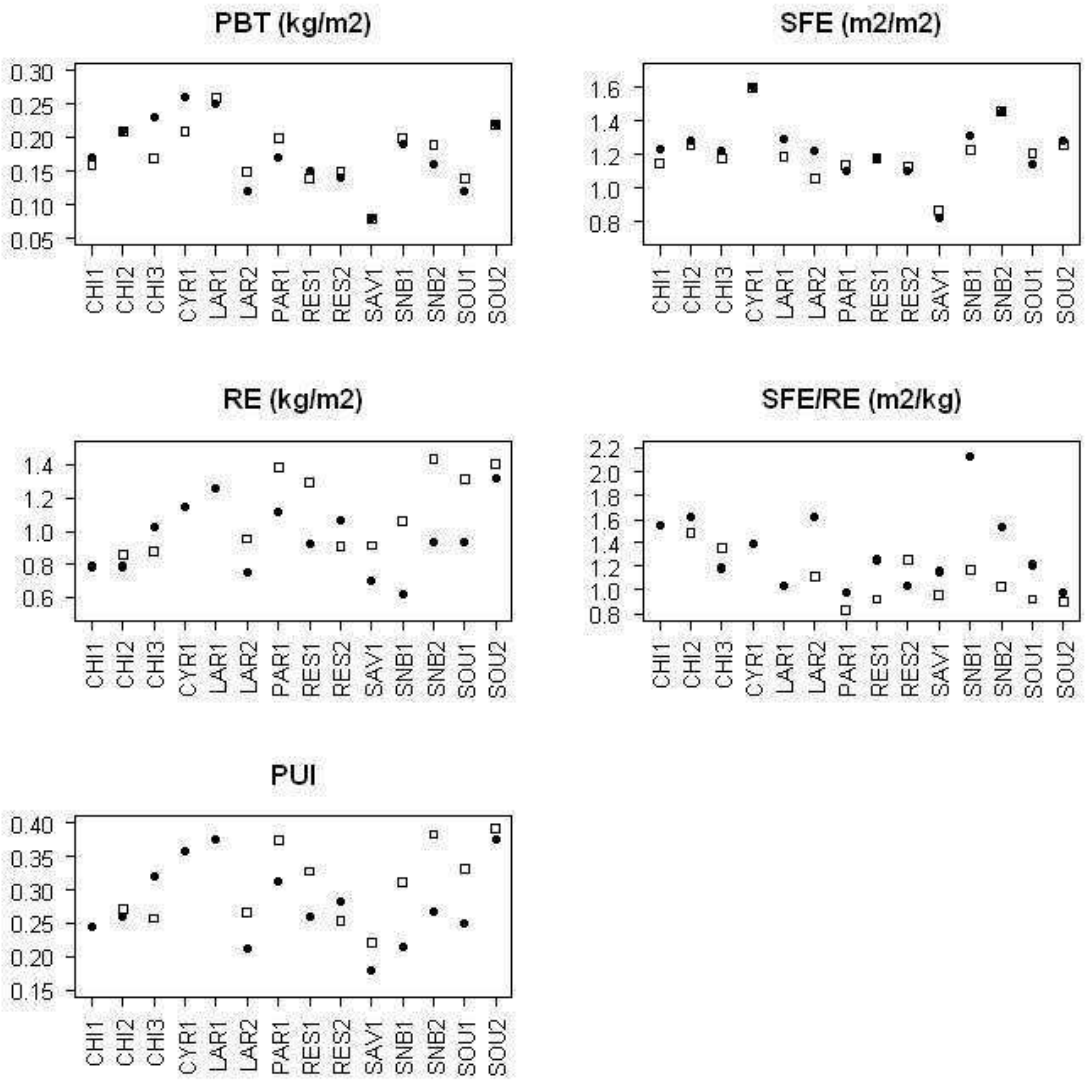


Figure 26 : Caractérisation du poids de bois de taille (PBT), de la surface foliaire exposée (SFE), du poids de récolte (RE), du rapport surface foliaire exposée / poids de récolte (SFE/RE) et de la puissance (PUI) pour chacune des quatorze parcelles d'étude et pour les deux millésimes : 2002 (carré blanc) et 2005 (rond noir). Toutes les valeurs initiales sont disponibles en annexe 7.

Afin de regrouper les couples 'parcelle-année' et caractériser chaque groupe, nous avons utilisé une classification ascendante hiérarchique (CAH). La CAH a été réalisée sur les composantes d'une analyse en composantes principales (ACP) suivant la distance euclidienne et la méthode de Ward (Saporta 2006). L'ACP a été calculée, pour les vingt-huit couples 'parcelle-année', à partir des valeurs des cinq variables caractérisant le développement végétatif et reproducteur des parcelles : le poids de bois de taille (PBT), la surface foliaire exposée (SFE), le poids de récolte (RE), le rapport entre la surface foliaire et le poids de récolte (SFE/RE) et la puissance (PUI). Les valeurs manquantes de poids de récolte en 2002 ont été estimées suivant la méthode 'du plus proche voisin' (Saporta 2006). Les deux premières dimensions expliquent 91.5% de la variabilité. Suivant la CAH, un partitionnement optimal est obtenu pour trois groupes que nous appelons DEV1, DEV2 et DEV3 (Figure 27). Ces trois groupes sont respectivement composées de huit, dix et dix couples 'parcelle-année'. Une analyse factorielle discriminante (AFD) réalisée suivant ces trois groupes, pour les cinq variables et l'ensemble des parcelles, indique, d'après le critère du Lambda de Wilks (Saporta 2006), que les groupes sont bien séparées (p-value <0.0001).

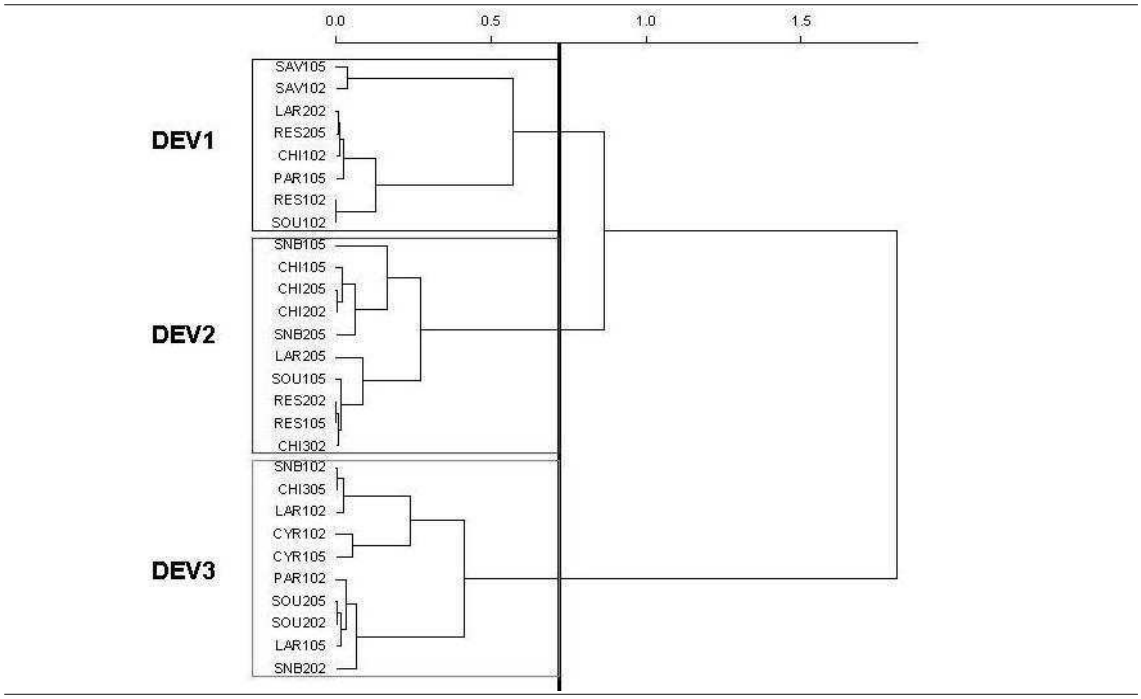


Figure 27 : Dendogramme issu de la Classification Ascendante Hiérarchique réalisée à partir des valeurs des cinq variables suivantes : le poids de bois de taille, la surface foliaire exposée, le poids de récolte, le rapport entre la surface foliaire et le poids de récolte et la puissance, pour les quatorze parcelles et les deux années (2002 et 2005) de suivis. Le trait vertical indique le niveau de coupure permettant un partitionnement optimal, trois groupes sont obtenus : DEV1, DEV2 et DEV3.

La classe DEV3 s'oppose aux classes DEV1 et DEV2 sur la première dimension et la classe DEV1 aux classes DEV2 et DEV3 sur la seconde dimension de l'ACP (Figure 28).

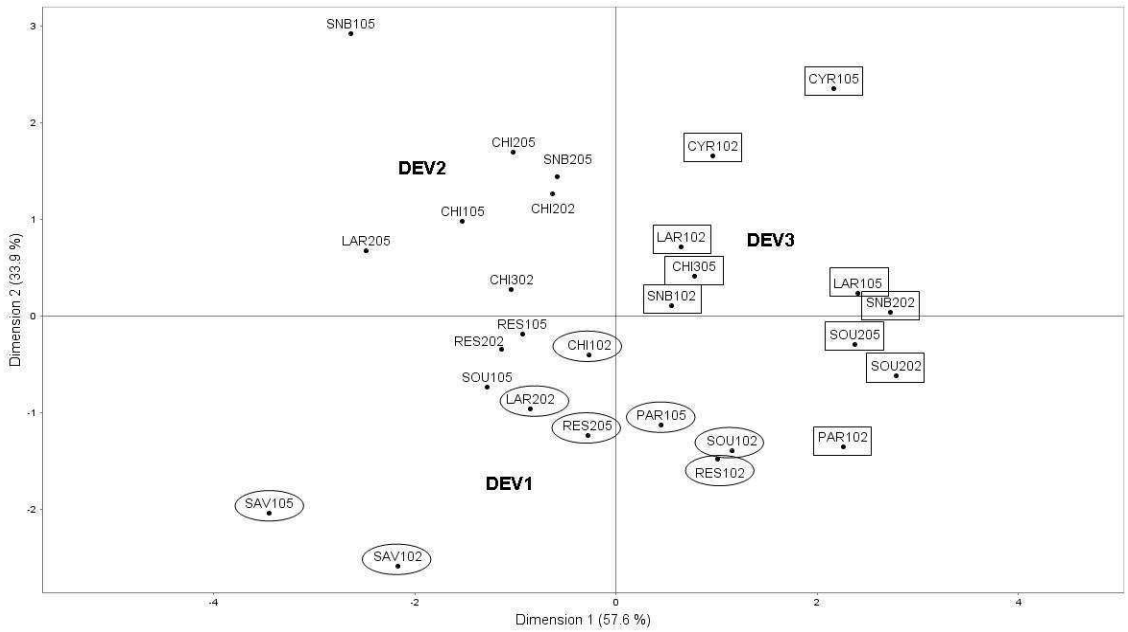


Figure 28 : Représentation des individus (couples 'parcelle-année') par Analyse en Composantes Principales des valeurs des cinq variables suivantes : le poids de bois de taille, la surface foliaire exposée, le poids de récolte, le rapport entre la surface foliaire et le poids de récolte et la puissance, pour les quatorze parcelles et les deux années (2002 et 2005) de suivis. Les groupes de la Classification Ascendante Hiérarchique et leur barycentre sont indiqués : DEV1, DEV2 et DEV3.

La première dimension de l'ACP est principalement expliquée par trois variables : la puissance (PUI), le poids de récolte (RE) et le poids de bois de taille (PBT). La seconde dimension est principalement expliquée par trois variables : le rapport entre la surface foliaire exposée et le poids de récolte (SFE/RE), la surface foliaire exposée (SFE) et le poids de bois de taille (PBT). Les variables les plus explicatives correspondent aux variables qui ont une contribution supérieure à la contribution moyenne qui est de 20% (Tableau 24).

Tableau 24 : Coordonnées et contributions des cinq variables suivantes : le poids de bois de taille (PBT), la surface foliaire exposée (SFE), le poids de récolte (RE), le rapport entre la surface foliaire et le poids de récolte (SFE/RE) et la puissance (PUI), pour les deux premières dimensions de l'Analyse en Composantes Principales. En gras les variables ayant une contribution supérieure à la contribution moyenne.

	Dimension 1	Dimension 2
PBT	0.67 – 15.7%	**0.60 – 21.6%**
SFE	0.51 – 9.1%	**0.77 – 34.6%**
RE	**0.93 – 29.9%**	-0.34 – 6.4%
SFE/RE	-0.57 – 11.3%	**0.80 – 37.4%**
PUI	**0.99 – 33.9%**	-0.04 – 0.1%

Suivant les valeurs des coordonnées des variables les plus explicatives et les coordonnées des barycentres de chaque groupe pour chaque dimension, chaque groupe peut être caractérisé. Ainsi, le groupe DEV1 a des valeurs de PBT, SFE, RE, SFE/RE et PUI plus

faibles ; DEV2 a des valeurs de RE et PUI plus basses et des valeurs de PBT, SFE et SFE/RE plus fortes, tandis que DEV3 montre des valeurs de PBT, SFE, RE, SFE/RE et PUI plus importantes.

Nous avons affiné cette caractérisation de la manière qui suit. Lorsque l'ensemble des individus d'un groupe a des coordonnées positives sur chaque dimension, alors, les valeurs des variables les plus explicatives sont jugées beaucoup plus fortes (↗↗). Si certains individus ont des coordonnées négatives, les valeurs sont jugées plus fortes (↗). En appliquant la même approche aux variables à coordonnées négatives, on en déduit des valeurs jugées beaucoup plus faibles (↘↘) ou plus faibles (↘) (Tableau 25). Ainsi DEV1 a des valeurs plus faibles pour toutes les variables, particulièrement pour le poids de bois de taille, la surface foliaire et le rapport surface foliaire / poids de récolte. Ce groupe a donc une plus faible expression végétative et une capacité de production inférieure. DEV2 montre des valeurs plus élevées pour le poids de bois de taille et la surface foliaire et beaucoup plus basses pour les poids de récolte. Cela explique un rapport surface foliaire / poids de récolte plus fort et une puissance beaucoup plus faible ; ainsi, ce groupe présente une expression végétative forte au détriment de la capacité de production. DEV3 possède des valeurs de puissance bien supérieures, en raison de poids de récolte beaucoup plus forts et de poids de bois de taille plus élevés. Ce groupe a donc de fortes expression végétative et capacité de production (Tableau 25).

Tableau 25 : Caractérisation des trois groupes de couples 'parcelle-année' vis à vis du développement végétatif et reproducteur, issus de la Classification Ascendante Hiérarchique suivant les valeurs des cinq variables utilisées pour l'analyse : le poids de bois de taille (PBT), la surface foliaire exposée (SFE), le poids de récolte (RE), le rapport entre la surface foliaire et le poids de récolte (SFE/RE) et la puissance (PUI). Les valeurs indiquées sont les suivantes : moyenne [minimale; maximale]. Les flèches indiquent que : l'ensemble des individus du groupe a des coordonnées positives (↗↗) sur les deux premières dimension de l'Analyse en Composantes Principale ou négatives (↘↘), seuls certains individus ont des coordonnées positives (↗) ou négatives (↘).

	DEV1	DEV2	DEV3
PBT (kg/m²)	↘↘ 0.13 [0.08;0.17]	↗ 0.16 [0.12;0.21]	↗ 0.22 [0.19;0.26]
SFE (m²/m²)	↘↘ 1.06 [0.82;1.21]	↗ 1.24 [1.13;1.45]	↗ 1.33 [1.14;1.60]
RE (kg/m²)	↘ 1.05 [0.70;1.31]	↘↘ 0.84 [0.62;0.94]	↗↗ 1.25 [1.03;1.43]
SFE/RE (m²/kg)	↘↘ 1.01 [0.92;1.16]	↗ 1.50 [1.21;2.13]	↗ 1.06 [0.83;1.40]
PUI	↘ 0.27 [0.18;0.33]	↘↘ 0.25 [0.21;0.27]	↗↗ 0.36 [0.31;0.39]

Des parcelles des années 2002 et 2005 sont incluses dans chaque groupe. Ainsi, d'après nos résultats, il ne ressort pas d'effet millésime concernant les caractéristiques du développement végétatif et reproducteur. De plus, certaines parcelles appartiennent au même groupe quelle que soit l'année (cas de SAV1 - DEV1, CHI2-DEV2, CYR1-DEV3, SOU2-DEV3 et

LAR1-DEV3) ce qui souligne le poids de l'effet 'parcelle'. Cette constatation confirme l'intérêt de caractériser le fonctionnement de la vigne, indépendamment des facteurs climatiques, en étudiant l'effet des facteurs du milieu stables et des pratiques culturales.

La mise en relation des valeurs de poids de bois de taille (PBT), de surface foliaire exposée (SFE) ou de puissance (PUI) avec celles de la variable VIG_ITK, évoquée au Chapitre 2., n'indique aucune corrélation significative. Le système d'inférence floue (SIF), construit au Chapitre 2., ne permet pas de prédire correctement la vigueur de l'ensemble des parcelles du réseau. La mise en relation de la vigueur simulée par le SIF et du poids de bois de taille, pour chaque parcelle, est présentée sur la figure 29.

Revenons sur la construction du SIF pour comprendre ces résultats. Nous nous sommes basés sur une gamme de variation de 0.19 kg à 0.52 kg de poids de bois de taille sec par cep, correspondant à 0.09 kg à 0.26 kg/m². Nous observons sur les parcelles une variation de 0.08 à 0.23 kg/m². La gamme de variabilité sur laquelle est basée le SIF est donc en adéquation avec celle observée pour les quatorze parcelles. Il faut toutefois noter que onze parcelles sur les quatorze n'étaient pas enherbées lors de leur suivi en 2002 et 2005. Le SIF a été majoritairement construit à partir de données de parcelles enherbées, cette pratique étant devenue très fréquente sur les vignobles de la moyenne Vallée de la Loire. Cela peut expliquer les mauvaises prédictions pour les parcelles d'étude. Lorsque nous avons déterminé les groupes au sein de la base des cent-cinquante-deux parcelles de la zone de Saumur, seulement deux d'entre eux n'étaient pas enherbés (groupes #8 et #14, Tableau 17, p. 98). Ces groupes n'ont pas fait partie de la sélection des soixante-dix-huit parcelles et n'ont donc pas servi à construire le modèle. Lorsque nous avons testé les performances du SIF sur l'ensemble des parcelles, il est apparu que la vigueur du groupe #8 était très mal prédite par le SIF, par contre les résultats pour le groupe #14 étaient satisfaisants. Les caractéristiques des onze parcelles non enherbées (VIG_MIL moyen de 2.4 avec une variance de 0.2 et un porte-greffe 3309C qui confère une vigueur de niveau 2) se rapprochent, cependant, des caractéristiques du groupe #8 dont la vigueur est mal prédite (VIG_MIL moyen de 2.5 avec une variance de 0.1 ; et niveau de vigueur moyen conféré par le porte-greffe de 2.1 avec une variance de 0.1). Le groupe #14 correspond à la combinaison d'un sol induisant une vigueur assez faible, avec une valeur moyenne de VIG_MIL de 1.7 (alors que VIG_MIL varie entre 1.9 et 3 pour les 14 parcelles) et d'un porte-greffe conférant une plus forte vigueur.

La mise en relation, pour les quatorze parcelles d'étude, des poids de bois de taille et des valeurs de VIG_ITK (Figure 29), nous apporte toutefois des informations complémentaires pour utiliser et améliorer le SIF construit. Suivant le comportement du SIF, pour un porte-greffe moyennement vigoureux comme le 3309C, et un mode d'entretien du sol fortement concurrentiel, plus la valeur de VIG_MIL augmente, plus la vigueur prédite VIG_ITK augmente. En considérant que l'évaluation de la contrainte du mode d'entretien du sol est correcte, seule la variable VIG_MIL peut donc être à l'origine des différences de valeurs entre parcelles. En

considérant les trois parcelles enherbées (CYR1, RES2 et SOU1), la réserve en eau utile maximale du sol (RUM) est la seule variable d'entrée de VIG_MIL pouvant être différente entre ces parcelles (CYR1 a une RUM plus faible que SOU1, et RES2 a une valeur intermédiaire entre CYR1 et SOU1). Cet exemple met donc à nouveau en évidence le rôle majeur de la variable 'réserve en eau du sol' et par conséquent le besoin de la connaître avec précision. La vigueur de la parcelle, non enherbée, SAV1 est très mal simulée par le SIF. Cette parcelle présente des remontées capillaires pouvant asphyxier le système racinaire à cause de la proximité avec la Loire. Ce dernier type de situation peut être pris en compte par l'ajout, dans le SIF, d'une ou plusieurs règles de décision (étant donné la sensibilité variable de chaque porte-greffe à cette contrainte).

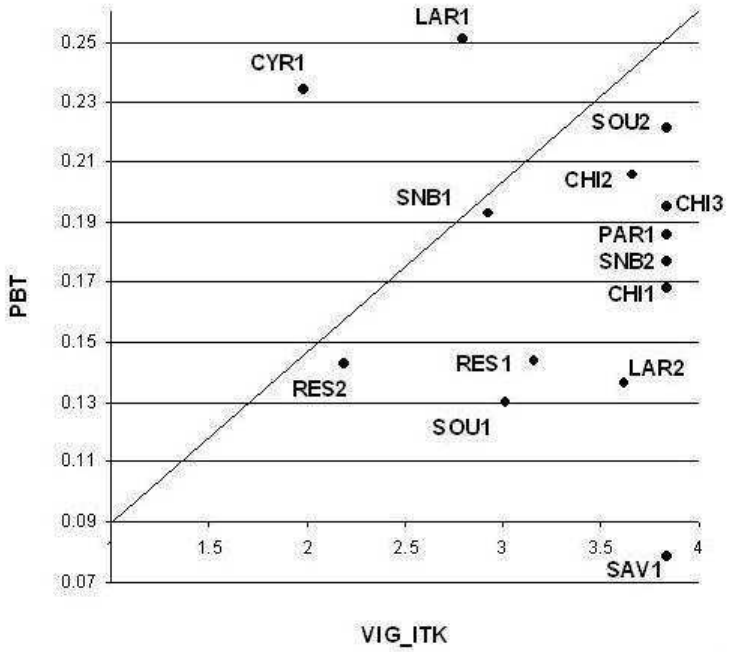


Figure 29 : Mise en relation des valeurs moyennes (pour 2002 et 2005) des poids de bois de taille (PBT) et des valeurs de la variable composite caractérisant la vigueur induite par les facteurs du milieu et les pratiques (VIG_ITK), pour les quatorze parcelles d'étude. La diagonale correspond à la correspondance des valeurs de la variable VIG_ITK avec celles des poids de bois de taille établie lors de la construction de VIG_ITK.

3.2. Précocité du développement de la vigne

Trois stades phénologiques avaient été déterminés : le mi-débourrement, la mi-floraison et la mi-véraison. Le mi-débourrement correspond à un taux de 50 % de bourgeons qui ont atteint le stade pointe verte (C) défini par (Baggiolini 1952). Pour les notations de mi-floraison et de mi-véraison, un pourcentage global par cep a été évalué par notation visuelle comme pour le débourrement. Les notations des trois stades, ont été réalisées trois fois par semaine, du début d'apparition du stade jusqu'à ce que les parcelles aient dépassé un taux de 70%. Elles ont permis d'établir les cinétiques moyennes de débourrement, floraison et véraison de chaque parcelle. On en déduit la date correspondant au taux de 50% pour chaque stade, considérée

comme la date de référence du stade.

Une date de maturité a aussi été identifiée. Elle correspond à la date à laquelle les parcelles avaient atteint un indice de maturité (sucre (g/l) /acidité totale (g d'H2SO4)) égal à 31. Cette date permet d'évaluer la précocité des parcelles vis à vis de cette maturité. La valeur 31 était commune à l'ensemble du jeu de données et la plus proche d'une maturité optimale.

La détermination des stades phénologiques a permis ensuite le calcul d'indices de précocité : de débourrement, de floraison et de véraison qui ont été calculés selon la méthode de Barbeau, Asselin, et al. (1998) (Equation 6).

$$iP = 100 \times \left(1 + \frac{Sm - Si}{Sm}\right)$$

Equation 6 : Indice de précocité selon (Barbeau *et al.*, 1998), avec iPs : indice de précocité du stade considéré, Sm : moyenne annuelle des dates du stade considéré pour l'ensemble des parcelles étudiées, Si : date du stade considéré de chacune des parcelles étudiées.

Suivant la même méthode, un indice a été calculé pour caractériser la précocité de la date de maturité technologique. Les parcelles présentant un indice inférieur à 100 sont jugées plus tardives et celles ayant un indice supérieur à 100 plus précoces, au sein de l'ensemble des parcelles étudiées (Figure 30).

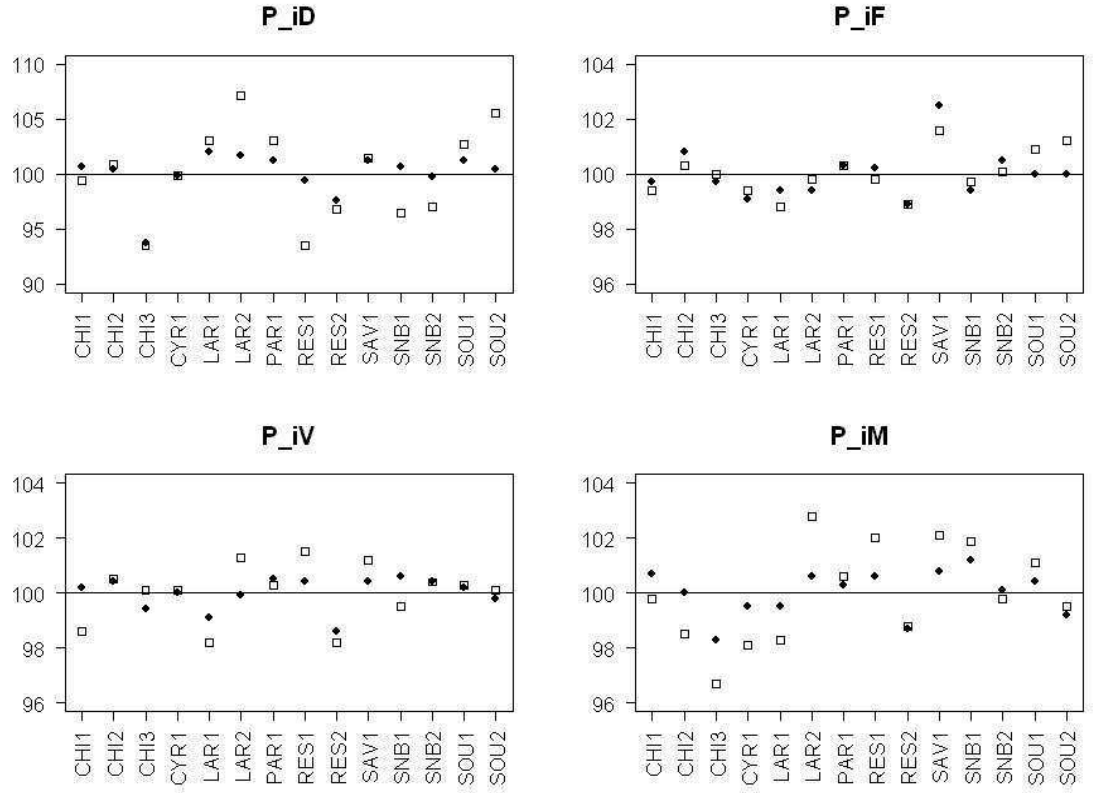


Figure 30 : Indices de précocité de débourrement (P_iD), de floraison (P_iF), de véraison (P_iV) et de maturité (P_iM) calculés pour chacune des quatorze parcelles d'étude et pour les deux millésimes : 2002 (carré blanc) et 2005 (rond noir). Toutes les valeurs initiales sont disponibles en annexe 6.

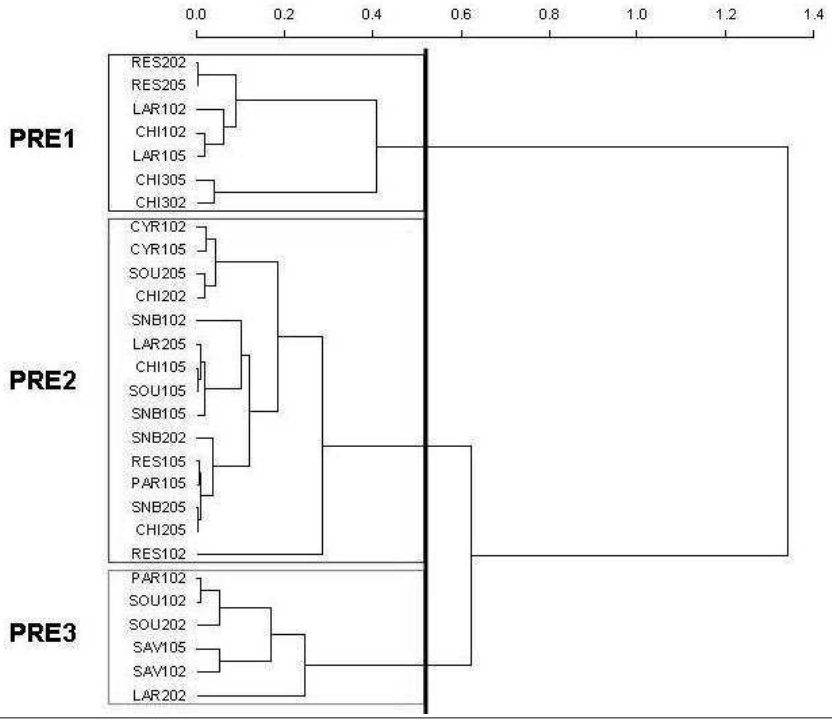


Figure 31 : Dendogramme issu de la Classification Ascendante Hiérarchique réalisée à partir des valeurs des quatre indices de précocité (de débourrement, de floraison, de véraison et de maturité), pour les quatorze parcelles et les deux années (2002 et 2005) de suivis. Le trait vertical indique le niveau de coupure permettant un partitionnement optimal, trois groupes sont obtenus : PRE1, PRE2 et PRE3.

Comme pour les variables caractérisant le développement végétatif et reproducteur, nous avons réalisé une classification ascendante hiérarchique (CAH) sur les composantes d'une analyse en composantes principales (ACP), suivant la distance euclidienne et la méthode de Ward. L'ACP a été réalisée, pour les vingt-huit couples 'parcelle-année', à partir des valeurs des quatre indices caractérisant la précocité des parcelles. Les deux premières dimensions expliquent 75.6% de la variabilité. Suivant la CAH (Figure 31), un partitionnement optimal est obtenu pour trois groupes, que nous appelons PRE1, PRE2 et PRE3. Ils sont respectivement composés de sept, quinze et six couples 'parcelle-année'. Une analyse factorielle discriminante (AFD) faite en fonction de ces trois groupes, pour les quatre variables et l'ensemble des parcelles, indique, d'après le critère du Lambda de Wilks, que les classes sont bien séparées (p-value <0.0001).

La séparation des groupes s'effectue principalement suivant la première dimension de l'ACP. Les groupes PRE1 et PRE3 s'opposent sur cette dimension, le groupe PRE2 étant intermédiaire (Figure 32).

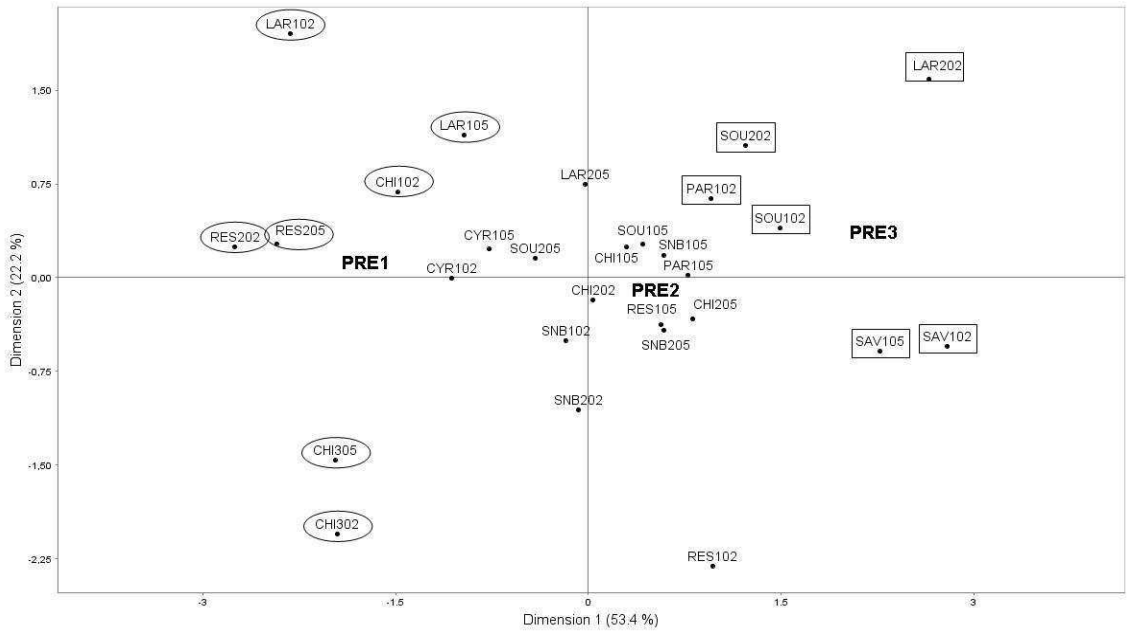


Figure 32 : Représentation des individus (couples 'parcelle-année') par Analyse en Composantes Principales des valeurs des quatre indices de précocité (de débourrement, de floraison, de véraison et de maturité), pour les quatorze parcelles et les deux années (2002 et 2005) de suivis. Les groupes de la Classification Ascendante Hiérarchique et leur barycentre sont indiqués : PRE1, PRE2 et PRE3.

La première dimension est principalement expliquée par trois variables : la précocité à la floraison (P_iF), la précocité à la véraison (P_iV) et la précocité à la maturité (P_IM). La seconde dimension est uniquement expliquée par la variable précocité au débourrement (P_iD) (Tableau 26). Cette seconde dimension ne permet pas de discriminer les groupes de précocité identifiés, toutefois certaines parcelles s'opposent sur cet axe : la parcelle CHI3, quelle que soit l'année est ainsi beaucoup plus tardive au débourrement que la parcelle LAR1 qui est plus précoce (Figure 32).

Tableau 26 : Coordonnées et contributions des quatre variables suivantes : indices de précocité de débourrement (P_iD), de floraison (P_iF), de véraison (P_iV) et de maturité (P_iM), pour les deux premières dimensions de l'Analyse en Composantes Principales. En gras, les variables ayant une contribution supérieure à la contribution moyenne.

	Dimension 1	Dimension 2
P_iD	0.52 – 12.5%	**0.83 – 76.8%**
P_iF	**0.75 – 26.3%**	-0.24 – 6.8 %
P_iV	**0.83 - 32.5%**	-0.37 – 15.6%
P_IM	**0.78 – 28.7%**	0.08 – 0.8 %

Chacun des groupes peut être caractérisé suivant les valeurs des coordonnées des variables les plus explicatives et celles des barycentres, ceci pour chaque dimension. Le groupe PRE1 a des valeurs plus élevées pour l'indice de précocité de débourrement et beaucoup plus élevées pour les indices floraison, véraison et maturité. Cela qualifie un développement plus

tardif. PRE3 a des valeurs plus élevées pour l'indice de précocité de débourrement et beaucoup plus faibles pour les indices floraison, véraison et maturité ; le développement est plus précoce. PRE2 à une précocité de développement moyenne (Tableau 27).

Tableau 27 : Caractérisation des trois groupes de précocité, issus de la Classification Ascendante Hiérarchique, suivant les valeurs des cinq variables utilisées pour l'analyse : indices de précocité de débourrement (P_iD), de floraison (P_iF), de véraison (P_iV) et de maturité (P_iM). Les valeurs indiquées sont les suivantes : moyenne [minimale; maximale]. Les flèches indiquent que : l'ensemble des individus du groupe a des coordonnées positives (↗↗) sur les deux premières dimension de l'Analyse en Composantes Principale ou négatives (↘↘), seuls certains individus ont des coordonnées positives (↗) ou négatives (↘).

	PRE1	PRE2	PRE3
P_iD	↗ 98.0 [93.5;1 03.0]	99.6 [93.5;101.7]	↗ 103.5 [101.2; 105.5]
P_iF	↘↘ 99.3 [98.8; 100.0]	99.9 [99.1;100.8]	↗↗ 101.0 [99.8; 102.5]
P_iV	↘↘ 98.9 [98.2; 100.1]	100.3 [99.5 ; 101.5]	↗↗ 100.6 [100.1;101.2]
P_iM31	↘↘ 98.6 [96.7; 99.8]	100.2 [98.1; 102.0]	↗↗ 101.2 [99.5;102.1]

Comme pour le développement végétatif et reproducteur, des couples de parcelles des années 2002 et 2005 sont inclus dans chaque groupe. Le calcul des indices de précocité permet de s'affranchir de l'effet du millésime. Il permet d'évaluer la réactivité des parcelles au millésime. Ainsi, les parcelles LAR1, RES2 et CHI3, qui appartiennent au groupe PRE1, sont plus tardives (à la floraison, véraison et maturité) que les autres, quel que soit le millésime. La parcelle SAV1 du groupe PRE3 est plus précoce que les autres parcelles en 2002 et 2005.

Dans le cadre de travaux de modélisation, il paraît souhaitable de pouvoir s'affranchir de l'effet du millésime sur la précocité du cycle de développement. La date de vendange est une variable d'ajustement pour obtenir des raisins à la maturité attendue. Il est important de pouvoir mettre en évidence et prédire des niveaux de précocité différents entre les parcelles.

Nous avons mis en relation, les indices de précocité avec la variable composite PRE_MIL, construite au chapitre précédent (Figure 33). Celle-ci caractérise les effets des facteurs du milieu. Les pratiques qui ont un effet sur la précocité au débourrement étaient toutefois fixées (date de taille et porte-greffe) pour les parcelles. Les corrélations ne sont pas satisfaisantes. Les valeurs de PRE_MIL sont cependant en relation avec les sorties de simulation de la date de débourrement du modèle de culture STICS-Vigne, obtenues en 2005 pour les parcelles non enherbées par Coulon (2006) et Garcia de Cortazar Atauri (2006). Ces auteurs avaient uniquement pris en compte les parcelles non enherbées dans leurs travaux.

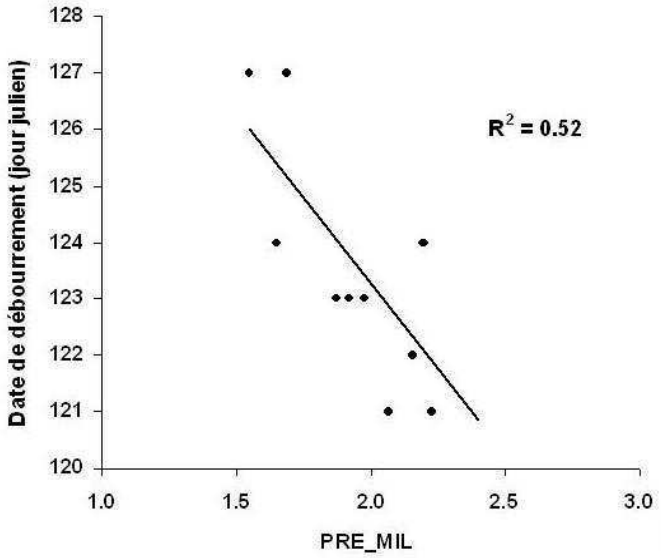


Figure 33 : Mise en relation de la date de débourrement prédit par le modèle de culture STICS-Vigne en 2005 et des valeurs de la variables composites caractérisant la précocité induite par les facteurs du milieu (PRE_MIL) pour les 11 parcelles non enherbées

Le modèle STICS-Vigne utilise le modèle BRIN pour simuler la date de débourrement (Garcia de Cortazar Atauri et al. 2005). Ce modèle ne prend en compte que des paramètres climatiques. La variable PRE_MIL construite retranscrirait donc de manière satisfaisante les conditions climatiques locales, mais ne serait pas suffisante pour prédire correctement la précocité au débourrement, toutefois suite à l'analyse en composantes principales, les groupes de précocité ne sont pas discriminés suivant cette variable.

3.3. Alimentation hydrique

Trois parcelles étant enherbées, nous avons choisi d'utiliser le modèle de bilan hydrique Walis, qui prend en compte la part d'eau consommée par l'enherbement (Celette et al. 2010). Nous ne connaissions toutefois pas précisément l'ensemble des paramètres nécessaires au modèle (paramètres liés au calcul du ruissellement et proportion de la réserve en eau du sol correspondant au compartiment 'herbe'), aussi nous avons utilisé les paramètres appliqués par (Delpuech et al. 2009) pour la parcelle du site expérimental de l'INRA-UE1117 à Montreuil-Bellay. Walis permet de calculer l'évolution journalière de la fraction d'eau transpirable du sol (FTSW).

Les valeurs de réserve en eau utile du sol maximale du sol (RUM) correspondent aux valeurs de FTSW au premier jour de calcul, elles permettent donc d'initialiser le modèle. La détermination de la RUM est ainsi un élément essentiel pour caractériser la disponibilité hydrique des parcelles et paramétrer au plus juste le modèle de bilan hydrique (Pellegrino et al. 2006). Nous avons calculé RUM suivant la méthode proposée par Goulet et al. (2004).

Les valeurs de FTSW, calculées suivant le modèle de bilan hydrique, peuvent être comparées à des mesures de potentiels hydriques de base. Nous avons utilisé la relation établie par Lebon et al. (2003): FTSW = $1.06.e^{5.35.Pb}$ (Pb : potentiel de base en MPa). Les potentiels hydriques foliaires de base avaient été mesurés deux fois en 2005, en utilisant une chambre à pression (Scholander et al. 1965). Les mesures avaient été réalisées en fin de nuit à l'obscurité totale sur des feuilles adultes prélevées dans la partie médiane du feuillage. Les valeurs obtenues en fin de nuit, en l'absence de transpiration, correspondent à la situation de réhydratation du feuillage maximale et homogène de la vigne, suite à la diminution des différences de pression entre les racines actives et le sol alentour (Carbonneau et al. 2007). Un échantillon de dix feuilles par parcelle et issues de ceps différents a été prélevé, les quatre mesures les plus extrêmes n'avaient pas été prises en compte pour éliminer les mesures issues d'une éventuelle mauvaise manipulation. Les bilans hydriques (évolution de FTSW au cours du cycle végétatif de la vigne) et les valeurs de potentiels de base sont présentés en annexe 8.

Nous avons ensuite caractérisé des itinéraires hydriques à partir des bilans hydriques. Codis (2000) dans (Payan et Salancon 2002) définissent des itinéraires hydriques à partir de niveaux de stress évalués pour cinq périodes du cycle de développement de la vigne, déterminées suivant l'accumulation de température : du débourrement à la floraison (0-300°j en base 10°C), la floraison (300-500°j), de la floraison à la véraison (500-900°j), la véraison (900-1000°j) et la maturation (1100-1300°j).

Nous avons utilisé la même méthodologie en prenant en compte, pour chaque couple 'parcelle – année', les dates des stades observés en considérant : la date de débourrement, la date de floraison, la date de véraison et la date de maturité technologique. Nous avons distingué quatre périodes : de la date de débourrement à la date de floraison, de la date de floraison à la date intermédiaire entre la date de floraison et la date de véraison, de cette dernière à la date de véraison, et de la date de véraison à la date de maturité technologique.

Le choix du niveau de stress d'une période a été réalisé suivant le nombre maximal de jours dans le niveau, si deux niveaux de contrainte étaient apparus pendant le même nombre de jours nous avons alors choisi le niveau de contrainte le plus élevé. Nous avons repris les seuils de contrainte hydrique établis par Carbonneau (1998) et Van Leeuwen et al. (2009), pour déterminer les niveaux de contraintes hydriques, et nous avons recalculé les seuils de FTSW correspondant suivant Lebon et al. (2003), les différentes valeurs sont indiquées dans le Tableau 28.

Tableau 28 : Correspondances entre les groupes et niveaux de contrainte hydrique, les valeurs des seuils de potentiels de base, les rapports isotopiques C13/C12 et la fraction d'eau du sol transpirable (FTSW) évaluée à partir d'un modèle de bilan hydrique, suivant Carbonneau (1998), Van Leeuwen et al. (2009) et Lebon et al. (2003).

Niveau de contrainte hydrique		Seuil de potentiel de base (MPa)	Rapport isotopique C13/C12 (‰)	FTSW (%)
CHYD1	Absence de contrainte	≥ -0.2	≤ -26	≥ 36
CHYD2	Contrainte faible	]-0.2 à -0.3]	[-24.5 à -26[	[21-36[
	Contrainte faible à modérée	]-0.3 à -0.5]	[-23 à -24.5[	[7-21[
CHYD3	Contrainte modérée à forte	]-0.5 à -0.8]	[-21.5 à -23[	[1-7[
	Contrainte forte	< -0.8	> -21.5	<1

Un itinéraire hydrique qui correspond à l'enchaînement des niveaux de stress, a ainsi pu être identifié pour chaque couple 'parcelle-année'.

Nous avons mis en relation le niveau de stress hydrique au cours de la maturation (c'est à dire entre la date de véraison et la date de maturité), évalué par le calcul des itinéraires hydriques, avec le niveau de stress hydrique évalué par la mesure du rapport isotopique C13/C12 (Tableau 29). Le rapport isotopique C13/C12 est un indicateur de la contrainte hydrique subie par la vigne au cours de sa période de maturation (Van Leeuwen et al. 2001). Un niveau de contrainte faible est simulé pour sept parcelles, suivant le calcul des itinéraires hydriques, alors qu'aucune contrainte hydrique n'est indiquée par la mesure des rapports C13/C12.

Tableau 29 : Mise en relation des niveaux de contrainte hydrique évalués suivant le calcul des itinéraires hydriques et de ceux évalués suivant la mesure du rapport istopique C13/C12. CHYD1 : absence de contrainte hydrique, CHYD2 ; contrainte hydrique faible à modérée, CHYD3 : contrainte hydrique modérée à forte.

		Niveaux de contrainte hydrique évalués suivant le calcul des itinéraires hydriques		
		CHYD1	CHYD2	CHYD3
Niveaux de contrainte hydrique évalués évaluée suivant la mesure du rapport isotopique C13/C12	CHYD1	**5**	7	
	CHYD2	2	**4**	2
	CHYD3		1	**7**

En observant les valeurs de FTSW qui correspondent aux mesures des potentiels hydriques de base (Annexe 8), FTSW semble sous-estimée pour douze parcelles sur les quatorze. Seule la parcelle SNB2 tendrait à avoir une évolution de FTSW sur-estimée. Quant aux valeurs de potentiels hydriques de base de SAV1, elles ne nous permettent pas de les comparer aux valeurs de FTSW. La valeur élevée lors de la seconde mesure, pour SAV1, pourrait s'expliquer par des remontées d'eau en raisin de la proximité de la Loire. Les sols sont constitués de plusieurs horizons qui peuvent avoir des humidités différentes à un moment

donné. Le potentiel hydrique foliaire de base à tendance à s'équilibrer avec l'horizon le plus humide exploré par le système racinaire (Ameglio et Archer 1996). Le potentiel ne s'abaisse alors que lorsque les horizons les plus humides s'assèchent.

Il faut noter que le calcul de RUM est très sensible à la valeur de densité apparente qui a parfois été approximée pour certains horizons, faute de mesures. De plus, pour les sols argileux du Sénonien les densités apparentes sont plus faibles, certains cailloux, notamment des spongolithes, sont plus légers, ce qui aboutit à une valeur de RUM calculée plus faible et ce qui peut expliquer notamment la forte sous-estimation pour la parcelle LAR2. La RUM est calculée sur toute la profondeur racinaire, toutefois des racines plongeantes, au dessous de la profondeur maximale prise en compte, peuvent concourir de manière significative à l'alimentation hydrique de la vigne.

La mise en relation des itinéraires hydriques avec des mesures de contraintes hydriques comme le rapport isotopique C13/C12, apporte des informations pour caractériser au mieux la diversification de l'itinéraire de fonctionnement, en fonction des conditions d'alimentation hydrique :

– La réserve en eau, permettant d'initialiser le calcul des itinéraires hydriques, doit être évaluée sur toute la profondeur du sol. Une correction peut être apportée pour prendre en compte l'alimentation hydrique due à des racines plongeantes.

– Les itinéraires hydriques peuvent être utilisés pour caractériser la contrainte hydrique des parcelles subie au cours de la période de maturation. Une incertitude sur l'évaluation doit toutefois être prise en compte.

En considérant les rapports isotopiques, variable la plus précise à notre disposition, de forts écarts d'alimentation hydrique entre les parcelles et entre les deux millésimes, ainsi que plusieurs cas de figure sont observés :

- La parcelle CHI3 appartient au groupe CHYD1 en 2002 et 2005. Cette parcelle ne subit pas de contrainte hydrique quel que soit le millésime, elle est peu sensible au millésime.
- La parcelle RES1 appartient au groupe CHYD2 en 2002 et 2005. Cette parcelle est également peu sensible au millésime mais en subissant une contrainte hydrique faible.
- Les parcelles CHI1, CYR1, RES2, SOU1 et SOU2 appartiennent au groupe CHYD1 en 2002 et CHYD2 en 2005. Ces parcelles présentent une sensibilité au millésime.
- Les parcelles CHI2, LAR1, LAR2, PAR1, SNB1 et SNB2 appartiennent au groupe CHYD1 en 2002 et CHYD3 en 2005. Ces parcelles présentent une forte sensibilité au millésime.

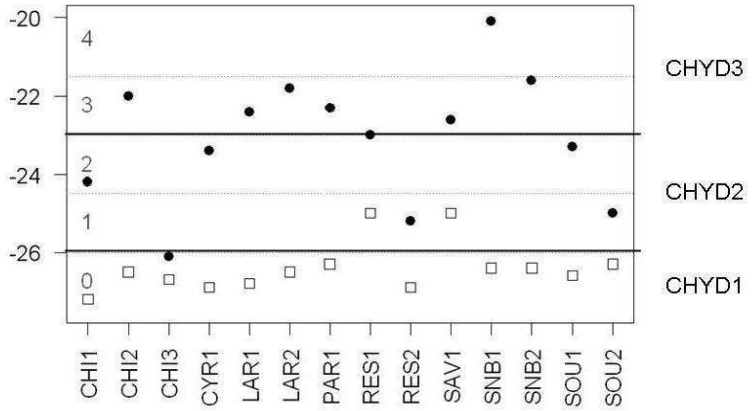


Figure 34 : Valeurs des rapports isotopiques C13/C12 pour chacune des quatorze parcelles d'étude et pour les deux millésimes : 2002 (carré blanc) et 2005 (rond noir).

Les rapports isotopiques nous fournissent une information très précise indiquant le niveau de stress au cours de la maturation, c'est à dire après la véraison. Le calcul des itinéraires hydriques est moins précis puisqu'il est basé sur des données présentant un certain niveau d'incertitude, toutefois il permet d'apprécier le niveau de stress hydrique tout au long du cycle végétatif. Le calcul de l'itinéraire hydrique peut être utilisé pour évaluer la diversification de l'itinéraire de fonctionnement en fonction de l'alimentation hydrique.

3.4. Combinaisons des variables caractérisant le fonctionnement de la vigne.

Trois ensembles de variables peuvent permettre de caractériser les itinéraires de fonctionnement des parcelles : les caractéristiques de développement végétatif et reproducteur, le niveau de précocité et celui de contrainte hydrique. Chaque ensemble a été partitionné en trois groupes, ce qui peut correspondre, par combinaisons, à vingt-sept itinéraires de fonctionnement théoriques. Suivant la classification que nous avons obtenue à partir des données des quatorze parcelles d'étude et des deux années de suivi, seize itinéraires de fonctionnement sont identifiés. Huit sont représentés par un seul couple 'parcelle-année', cinq par deux couples, deux par trois couples et un par quatre couples (Tabbleau 30).

Tableau 30 : Identification des itinéraires de fonctionnement par combinaisons des trois ensembles de variables suivantes : celles caractérisant le développement végétatif et reproducteur (groupes DEV1, DEV2 et DEV3) : poids de bois de taille (PBT), surface foliaire exposée (SFE), poids de récolte (RE), rapport entre la surface foliaire exposée et le poids de récolte (SFE/RE) et la puissance (PUI); celles caractérisant la précocité de développement (groupes PRE1, PRE2 et PRE3) : indices de précocité de débourrement (P_iD), de floraison (P_iF), de véraison (P_iV) et de maturité (P_iM), les valeurs du rapport isotopique C13/C12 caractérisant la contrainte hydrique (groupes CHYD1 : absence de contrainte hydrique, CHYD2 : contrainte hydrique faible à modérée et CHYD3 : contrainte hydrique modérée à forte).

		PRE1 Tardive	PRE2 Moyenne	PRE3 Précoce
DEV1 **PBT ↘↘** **SFE ↘↘** **RE ↘** **SFE/RE ↘↘** **PUI ↘**	**CHYD1**	CHI102		LAR202 SOU102
	CHYD2	RES205	RES102	SAV102
	CHYD3		PAR105	SAV105
DEV2 **PBT ↗** **SFE ↗** **RE ↘↘** **SFE/RE ↗** **PUI ↘↘**	**CHYD1**	CHI302 RES202	CHI202	
	CHYD2		CHI105 RES105 SNB205 SOU105	
	CHYD3		CHI205 LAR205 SNB105	
DEV3 **PBT ↗** **SFE ↗** **RE ↗↗** **SFE/RE ↗** **PUI ↗**	**CHYD1**	CHI305 LAR102	CYR102 SNB102 SNB202	PAR102 SOU202
	CHYD2		CYR105 SOU205	
	CHYD3	LAR105		

L'étude des combinaisons des groupes, nous amène à faire plusieurs observations :

– Quatre parcelles appartiennent, en 2002 et 2005, à la même combinaison entre les groupes DEV et PRE : LAR1 (DEV3-PRE1), CYR1 (DEV3-PRE2), CHI2 (DEV2-PRE2) et SAV1 (PRE3-DEV1). Ces parcelles subissent ensuite des niveaux de contrainte hydrique différents suivant le millésime.

– Quatre parcelles appartiennent au même groupe de précocité, en 2002 et 2005, mais à des groupes différents de développement végétatif et reproducteur : CHI3 (DEV2-PRE1 en 2002 et DEV3-PRE1 en 2005), RES2 (DEV2-PRE1 en 2002 et DEV1-PRE1 en 2005), RES1 (DEV1-PRE2 en 2002 et DEV2-PRE2 en 2005), SNB1 (DEV3-PRE2 en 2002 et DEV2-PRE2 en 2005). Ces parcelles auraient donc un même niveau de précocité mais un fonctionnement différent, étant donné des caractéristiques de développement végétatif et reproducteur différentes.

– Aucune parcelle n'appartient à un même groupe de développement végétatif et reproducteur mais à des groupes différents de précocité.

– Cinq parcelles : CHI1, PAR1, SNB2, LAR2, SOU2 et SOU1 appartiennent à des groupes différents de précocité et de développement végétatif et reproducteur. Des appartenances à des combinaisons différentes peuvent être expliquées par une forte sensibilité au millésime.

– Deux parcelles appartiennent lors de deux années différentes au même itinéraire de fonctionnement (CHI3 en 2005 et LAR en 2002). Des fonctionnements identiques peuvent être observés pour des parcelles différentes et des millésimes divers. Il semble donc opportun de définir des itinéraires de fonctionnement de référence, ceux-ci pouvant être rencontrés, suivant les caractéristiques des parcelles, lors de millésimes variés.

Ces analyses nous ont permis de confronter le concept d'itinéraire de fonctionnement à des données réelles. A partir de ces résultats, nous pouvons donc affirmer que la valeur origine d'un point de vue écophysiologique de l'itinéraire de fonctionnement ne peut pas être définie pour toutes les situations, indépendamment de facteurs annuels, étant données des sensibilités au millésime différentes. Des facteurs annuels, comme la gestion du rendement, ajustable par les pratiques de taille et d'éclaircissage, doivent également être pris en compte.

Chapitre2. Identification de types de 'produit raisin/vin'

1. Méthodologie de caractérisation des types de 'produit raisin/vin'

Nous avons procédé à un recueil d'expertise auprès de neuf professionnels de la zone d'étude (Figure 35): trois viticulteurs (VITI1, VITI2 et VITI3), trois œnologues (OENO1, OENO2 et OENO3) et trois conseillers ou techniciens (CONS1, CONS2 et CONS3). Les zones d'action des œnologues et conseillers sont indiquées sur la figure 35. Les viticulteurs retenus ont été choisis car ils produisent des raisins de qualité et cherchent à faire des vinifications à l'échelle parcellaire, ce qui implique d'attribuer un type de vin à une parcelle. Ils ont été sélectionnés au sein d'un groupe d'exploitations suivies dans le cadre d'une autre action de l'UMT Vinitera. VITI2 et VITI3 sont proches, toutefois ils sont actifs dans différentes instances professionnelles. Nous n'avons pas choisi de viticulteurs en Anjou, ceux présents au sein du groupe présélectionné dans d'autre travaux, ne produisaient qu'un type de vin par appellation (par exemple un Anjou Rouge et un Anjou Village Brissac), nous avons choisi de privilégier des viticulteurs sur la zone de l'appellation Saumur et Chinon, ceux-ci produisant plusieurs types de vin par appellation. La moyenne Vallée de la Loire est ainsi bien couverte.

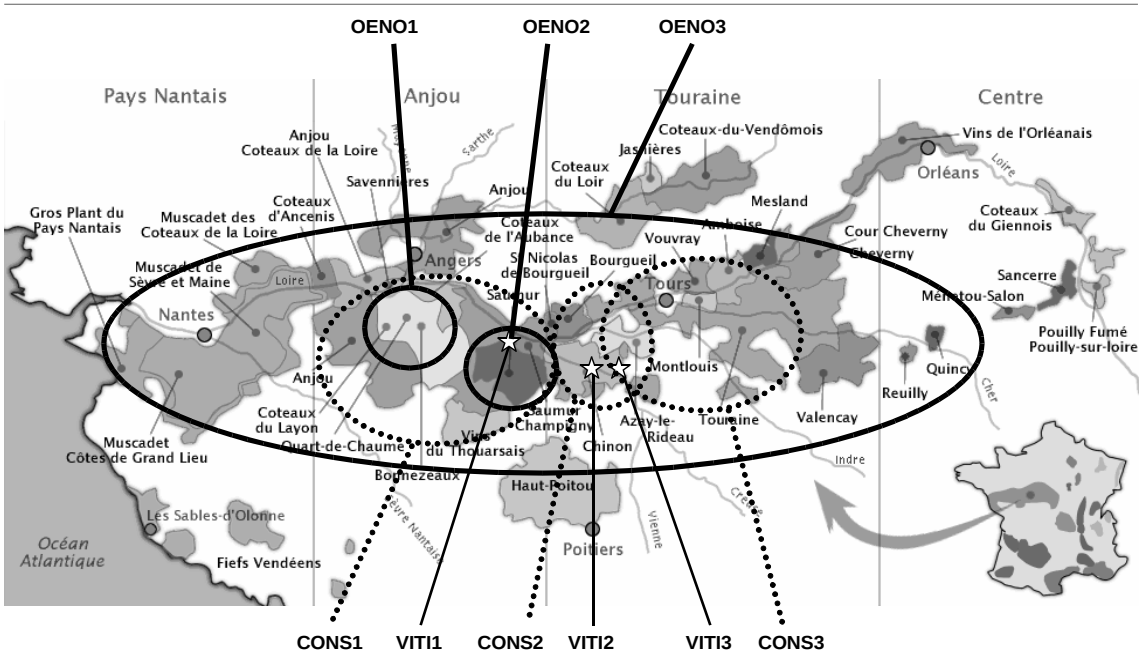


Figure 35 : Localisation des neufs experts (OENO : oenologue, CONS : technicien ou conseiller viticole, VITI : viticulteur) interrogés pour construire la typologie 'produit raisin/vin' et de leur zone d'action (Source de la carte : Technoresto.org)

Les professionnels de la filière viti-vinicole ont d'abord été interviewés en entretiens individuels. Lors de ces derniers, nous leur avons posé les questions ouvertes suivantes :

- Pensez-vous que l'on puisse parler de différents types de raisins?
- Si oui, si l'on considère le Cabernet Franc, pourriez-vous citer les types de raisins existants sur toute la gamme possible?
- Pouvons-nous associer des critères caractérisant le raisin avec leur niveau (faible/fort) ou une gamme de valeurs à ces types ?

Cette première phase nous a permis d'identifier, pour chaque expert, les types de produits qu'il considère et les critères associés. Nous avons questionné les experts sur les types de raisin, en pensant, dans un premier temps, caractériser des types de raisin, qui seraient ensuite reliés à des types de vins. Une synthèse a ensuite eu lieu : les types de produits ont été regroupés et les critères hiérarchisés par fréquence de citation. Cette synthèse a été présentée au groupe d'experts au cours d'une réunion de consensus. L'objectif était, dans cette seconde phase, de valider les types retenus et les critères associés.

2. Identification des types par expertise de professionnels

Le groupe de professionnels de la filière viti-vinicole a cité trente-trois critères à prendre en compte pour caractériser le raisin (Annexe 9). Les critères peuvent être classés en trois catégories suivant la méthode employée pour les mesurer : les critères issus de l'observation des baies (cinq critères), ceux issus de l'analyse biochimique des baies (treize critères) et ceux issus de la dégustation des baies (quinze critères).

Les trois premiers critères cités (pourcentage de pourriture grise, taux de sucre et arôme des baies) sont considérés, par le groupe, comme des facteurs qui permettent de choisir la date de vendange optimale. Ces trois critères ont été cités par les neufs professionnels interrogés. Ubigli et al. (1996) et Cadot (2010) ont montré que l'impact de la date de vendange sur les caractéristiques sensorielles du vin est fort ; le choix de la date de vendange conditionne le type de produit obtenu.

L'acidité totale et le pH sont également des facteurs importants (cités respectivement, six et cinq fois sur neuf). Ils peuvent aussi permettre d'orienter le choix de la date de vendange. Certains experts signalent cependant que le niveau d'acidité est fortement dépendant du millésime et que pour des années présentant des acidités très élevées une correction en cave par des méthodes de désacidification doit être envisagée.

L'azote assimilable (citée cinq fois sur neuf) est aussi un critère important. De nombreux auteurs signalent son impact sur la qualité des vins (Keller et Hrazdina 1998; Choné 2001). Les professionnels ont précisé que la teneur en azote assimilable pouvait être corrigée en cave.

Ainsi, les critères les plus cités correspondent à ceux permettant principalement de choisir la date de vendange optimale. Ce sont aussi des critères qui peuvent être modifiés par des pratiques oenologiques. Ce ne sont donc pas des critères qui permettent de définir des types de produits en s'affranchissant de l'effet du millésime.

Pouvoir s'affranchir de l'effet du millésime peut être souhaitable, dans le cadre de la construction d'un modèle et d'un outil d'aide à la décision, permettant notamment d'indiquer très en amont un type de produit à privilégier sur une parcelle. Un certain nombre de parcelles peuvent, suivant les conditions du millésime, permettre l'élaboration d'une large gamme de produits. Dans ce cas, seule la date de vendange et l'état sanitaire conditionnent alors le type de raisin/vin. D'autre parcelles peuvent ne jamais atteindre des niveaux de maturité satisfaisants pour obtenir certains produits ; notamment des parcelles avec une faible interaction avec le millésime sur des terroirs tardifs (Barbeau, Morlat, et al. 1998). Comme nous avons pu l'indiquer lors de l'analyse des itinéraires de fonctionnement, il s'agit de prendre en compte la réactivité des parcelles au millésime.

Notre objectif n'est pas de prédire finement les caractéristiques du raisin suivant les conditions climatiques. Des modèles construits récemment permettent de prédire la maturation du raisin en fonction de valeurs initiales en début de maturation et de prédictions de données climatiques (Fernandez Martinez et al. 2012). Ces modèles peuvent être couplés à celui que nous envisageons. Notre méthode peut permettre de définir, suivant le fonctionnement des parcelles, ces valeurs initiales qui conditionnent ensuite le déroulement de la maturité du raisin et le type de vins.

Concernant les types de 'produit raisin/vin', il apparaît que sept experts sur neuf parlent directement de types de vin. Les deux experts qui prennent en compte les caractéristiques du raisin considèrent la dynamique de chargement en sucre des baies en tenant compte des travaux de (Carbonneau 2007) ; ils les relient toutefois ensuite à un type de vin. Dans le cadre de la démarche de modélisation que nous développons, il n'apparaît donc pas utile de caractériser le type de raisin mais bien de caractériser directement le produit final, certes dépendant des caractéristiques du raisin. Le terme de 'produit raisin/vin' est donc approprié.

Suite aux entretiens individuels et à la réunion de consensus, les professionnels ont identifié huit types de produit raisin/vin :

- ✔ Type 1: Le rouge végétal léger (VL)
- ✔ Type 2 : Le rouge fruité léger avec des tanins fondus (FLF)
- ✔ Type 3 : Le rouge fruité léger avec des tanins secs (FLS)
- ✔ Type 4 : Le rouge intermédiaire
- ✔ Type 5 : Le rouge végétal corsé (VC)
- ✔ Type 6 : Le rouge fruité corsé avec des tanins fondus (FCF)

- ✔ Type 7 : Le rouge fruité corsé avec des tanins secs (FCS)
- ✔ Type 8 : Le raisin altéré (il peut être vinifié jusqu'à un taux de pourriture de 50% en mettant en œuvre des techniques correctives ou une thermovinification).

L'état sanitaire, critère majeur pour les professionnels, est un critère qui peut déclencher la date de vendange. Toutefois, il peut arriver qu'étant donné des contraintes techniques, du raisin altéré par la pourriture grise soit vendangé. Les experts ont donc tenu à identifier un type « raisin altéré ». Des pratiques oenologiques correctives pouvant être mises en œuvre pour traiter ce type de raisin. L'objectif des professionnels est de pouvoir assurer la pérennité économique de l'exploitation ou de l'entreprise en produisant un volume suffisant pour répondre aux demandes de leur clientèle.

Les professionnels n'ont pas associé des niveaux de teneurs en sucre et d'acidité à chaque type, ces critères conditionnant la date de récolte et étant liés aux conditions du millésime. En revanche, ils y associent des critères liés à l'arôme des baies. Pour les professionnels, l'arôme 'Végétal' est associé au descripteur 'Poivron vert', identifiable dès la dégustation des baies. Selon la littérature, cet arôme est lié aux méthoxypyrazines qui sont retrouvées à l'état libre dans le raisin (Preston et al. 2008). Aucune référence bibliographique n'identifie de précurseur aromatique à ce jour. Cet arôme perçu lors de la dégustation des baies peut donc être retrouvé dans le vin (Conde et al. 2007). Cependant, d'autres molécules et descripteurs participent à l'arôme 'Végétal' des vins (Preston et al. 2008). Un certain nombre de molécules définissent l'arôme des vins, notamment toutes celles associées au caractère fruité qui sont mal connues. Elles agissent en interactions entre elles ou n'existent qu'à l'état de précurseurs aromatiques dans le raisin (Bayonove et al. 1998). Des travaux sont en cours pour caractériser finement les arômes du Cabernet franc[2] et devraient prochainement apporter des résultats complémentaires. Certains professionnels distinguent dans les baies les arômes de fruits frais, fruits mûrs et fruits sur-mûris. Toutefois, étant donné le manque de relation directe de cause à effet entre les arômes des baies et du vin, nous avons choisi de nous focaliser sur le caractère générique 'Fruité', celui-ci étant opposé au caractère 'Végétal' associé pour le Cabernet franc à l'arôme 'Poivron vert'.

En ce qui concerne les caractéristiques du vin, finalement trois critères utilisés par les professionnels permettent d'identifier le type de produit raisin/vin (en ne tenant pas compte du type 'raisin altéré') :

- l'arôme du vin : 'Végétal' à 'Fruité' ;
- la structure du vin : 'Léger' à 'Corsé' ;
- la qualité des tanins du vin : 'Tanins Fondus' à 'Tanins Secs'.

2 Projet INNOVAROMA 'Innovations pour l'analyse des notes odorantes des vins et des cidres', impliquant pour le vin les partenaires suivants : Institut Français de la Vigne et du Vin – Unités de Tours et d'Angers, Groupe ESA – Laboratoire GRAPPE, ONIRIS-UMR Flaveur et USC1124, INRA-UMR GMPA, Cave Viticole de Saumur.

3. Application et validation de la typologie aux parcelles d'étude

Les raisins des quatorze parcelles ont été vinifiés suivant des conditions standardisées (selon un protocole interne à l'INRA UEVV, présenté en annexe 10). Les grappes ont été triées pour que seules les grappes saines, sans pourriture grise, soient conservées. Les moûts des parcelles ont été ensemencés avec une levure sèche active. Les teneurs en azote assimilable ont été ajustées afin d'atteindre 150 mg/l. Si le degré alcoolique potentiel était inférieur à 12,8%, les moûts ont été chaptalisés. Le protocole de vinification visait à produire un vin rouge de moyenne gamme.

3.1. Deux méthodes d'évaluations sensorielles prises en compte

Deux types de jury ont évalué les vins issues des vingt-quatre couples 'parcelle-année' : un jury de professionnels de la moyenne vallée de la Loire et un jury expert.

Les juges professionnels qui ont noté les vins, étaient respectivement vingt-et-un en 2002 et seulement treize en 2005 par manque de disponibilité. En 2005, une liste de deux groupes de critères était proposée. Un premier groupe concernait les arômes et la structure du vin ; les professionnels pouvaient choisir parmi six possibilités : 'léger - animal', 'léger - végétal', 'léger – fruité', 'corsé – animal', 'corsé – fruité' ou 'corsé - végétal'. Un second groupe traitait des tanins, les professionnels pouvant retenir l'une des quatre possibilités suivantes : 'verts – durs – secs', légers – souples', 'puissants – rugueux' ou 'puissants - fins'. En 2002, les professionnels ont évalué les huit critères 'léger', 'corsé', 'végétal', 'fruité', 'tanins verts-durs-sec', 'tanins puissants rugueux', 'tanins légers souples' et 'tanins puissants fins' sur une échelle de 0 à 10.

Un traitement des données a permis d'obtenir, pour chaque année et parcelle, une note entre 0 et 10 pour les critères suivant : arôme 'Fruité' (opposé à 'Végétal'), structure 'Corsé' (opposé à 'Léger') et 'Tanins Secs' (opposés à 'Tanins Fondus'). Il s'agit des trois critères caractérisant les types de vins d'après les neufs professionnels interrogés, en 2011. Pour le critère caractérisant les tanins, le jury professionnel avait noté plus précisément les différents types de tanins. Nous avons donc fait un regroupement par lequel les 'Tanins Fondus' correspondent aux ‘tanins légers, souples’ ou aux ‘tanins puissants, fins’ et les 'Tanins Secs' aux ‘tanins verts, durs, secs’ ou aux ‘tanins puissants, rugueux’.

Une analyse de consensus a été réalisée. Elle consiste à procéder, pour chaque année et pour chaque critère, à une analyse statistique multidimensionnelle en composantes principales en considérant les vins comme des individus et les juges comme des variables. Une forte corrélation entre la première dimension de l'analyse et l’ensemble des variables correspond à un fort consensus entre les juges (Pineau 2006).

Le jury expert a utilisé un profil conventionnel (ISO 2003) pour décrire les vins. La méthode du profil conventionnel est une généralisation de la méthode Quantitative Descriptive Analysis (QDA®, Tragon Corporation) (Stone et al. 1974; Stone et Sidel 1998). Le but est d’établir une description la plus exhaustive possible des propriétés sensorielles des produits

étudiés. Elle est basée sur la recherche de descripteurs permettant de donner un maximum d'informations sur les propriétés sensorielles des produits étudiés, puis sur la quantification de ces descripteurs.

Les membres d'un jury expert sont des sujets qualifiés, recrutés pour leur acuité sensorielle, qui sont entraînés à l'utilisation des méthodes d'analyse sensorielle et qui sont capables d'effectuer de façon fiable l'analyse sensorielle de divers produits (Nicod 1998). La plateforme d'analyse sensorielle par jury expert est normalisée et la même pour les deux plateformes d'analyse sensorielles utilisées : la première à l'INRA d'Angers en 2002 et la seconde à l'UE Pech Rouge (UMR SPO) de l'INRA de Montpellier en 2005. Par la suite, les membres du jury expert final ont été sélectionnés en fonction de leurs performances vis à vis de leur répétabilité et leur niveau de consensus (Nicod 1998; Pineau 2006). Pour ce type de jury le maximum de consensus est recherché.

Les termes utilisés pour décrire les produits doivent être simples et compréhensibles par tout le jury. Par conséquent, le jury génère lui-même les descripteurs afin de faciliter la compréhension des termes. Dans le cas de mélange d'odeurs (odeurs complexes), il est important d'utiliser des descripteurs pouvant être perçus de manière unitaire et univoque (Lawless 1999). De la même manière, il est important que le choix des termes soit perçu sans ambiguïté sémantique (Cain 1979), qu'ils soient quantifiables objectivement (non hédoniques), pertinents, précis et discriminants et qu'ils représentent de manière exhaustive toutes les caractéristiques sensorielles des produits. Les descripteurs avec leur intitulé et leur définition sont générés par les juges, par consensus (Lawless et Heymann 1998). L'entraînement est un outil indispensable à la bonne réalisation d'un profil sensoriel. Il doit permettre aux sujets de maîtriser le vocabulaire spécifique, de mémoriser les images sensorielles afin de bien noter les produits par la suite. Les performances des juges sont évaluées pendant cette phase d'entraînement afin d'orienter le travail d'entraînement, mais aussi, à la fin de celui-ci, afin de valider la qualité du jury (Lawless et Heymann 1998; Pineau 2006). Une fois le jury entraîné, il peut être considéré comme un instrument de mesure homogène. Nous considérons donc les données obtenues par le jury expert comme nos données sensorielles de référence. La note prise en compte pour chaque descripteur correspond à la moyenne des notes données par chaque juge.

Les juges du jury expert ont généré en 2002, cinq descripteurs olfactifs et quatre gustatifs et en 2005, onze descripteurs olfactifs et six gustatifs (Tableau 31). Dans le cadre de notre étude, nous nous somme focalisés sur les descripteurs communs à chaque année. Les descripteurs sont indépendants les uns des autres, il est donc possible d'en extraire certains du profil afin de les analyser séparément des autres. Sept descripteurs étaient communs aux deux années, un vocabulaire différent a été attribué à trois d'entre eux entre les deux années (cuir / animal, gras / dense et chaleur/chaud) mais il est apparu que les deux termes peuvent à chaque fois être regroupés, du fait de la description donnée et de la diversité du vocabulaire

utilisé par les juges, en amont du choix du terme commun par consensus.

Tableau 31 : Liste des descripteurs générés et utilisés par chaque jury expert en 2002 et 2005. * : termes ayant la même signification.

Type de descripteurs	2002	2005
Olfactif	Intensité	Intensité
	Framboise	**Fraise**
	Fraise	Cassis
	Poivron Vert	Fruits à l'alcool
	Cuir*	Pruneaux
		Empyreumatique
		Réglisse
		Poivron Vert
		Animal*
		Terreux
		Moisi
Gustatif	**Astringence**	Acide
	Amer	Sucre
	Gras**	**Amer**
	Chaleur***	**Astringence**
		Dense**
		Chaud***

Les évaluations sensorielles par le jury de professionnels, en 2002 et 2005, nous permettent d'avoir une caractérisation des critères servant à définir les types de 'produit raisin/vin' identifiés par d'autres professionnels en 2011. Des désaccords peuvent existaient entre les professionnels (Lesschaeve 2003; Cadot 2010). Nous avons donc choisi de confronter les évaluations du jury de professionnels à celles du jury expert représentant la référence. Les caractéristiques des évaluations sensorielles utilisées dans cette étude sont synthétisées Tableau 32.

Tableau 32 : Evaluations sensorielles utilisées pour caractériser les types de 'produit raisin/vin' des quatorze parcelles d'étude.

	Jury de professionnels (JP)	Jury Expert (JE)
Nombre de juges	21 en 2002 et 13 en 2005	15 en 2002 et 20 en 2005
Critères (JP) ou descripteurs (JE) utilisés	3 : → Arôme 'Fruité' (opposé à 'Végétal') → Structure 'Corsé' (opposé à 'Léger') → 'Tanins Secs' (opposé à 'Tanins Fondus') Ces critères permettent de définir le type de 'produit raisin/vin'	7 : → Fraise → Poivron → Cuir/Animal → Gras/Dense → Amertume → Chaud/Chaleur → Astringence
	Chaque critère ou descripteur est noté de 0 (absent) à 10 (très fort)	
Nombre de couples 'parcelle-année' évalué	24 : 10 parcelles en 2002 et 14 en 2005	

3.2. Caractérisation des types par un jury de professionnels

Les critères utilisés par les juges professionnels pour caractériser chaque type ont été agrégés par un système d'inférence floue (SIF). La notation de chaque critère correspond à la moyenne des notes données par l'ensemble des juges. Les principes de base de la logique floue et des systèmes experts ont été présentés Chapitre 2.. Ce SIF est composé de six règles de décisions correspondant aux six types issus de la combinaison des trois critères (Tableau 33).

Tableau 33 : Règles de décision agrégeant les partitions de chaque critère afin de définir un type de 'produit raisin/vin'.

Critères			Typologie des experts
Arôme	Structure	Tanins	
Fruité	Corsé	Secs	Type FCS
Fruité	Corsé	Fondus	Type FCF
Fruité	Léger	Secs	Type FLS
Fruité	Léger	Fondus	Type FLF
Végétal	Corsé	Secs	Type VC
Végétal	Corsé	Fondus	
Végétal	Léger	Secs	Type VL
Végétal	Léger	Fondus	

Chaque critère est partitionné en deux ensembles flous (Tableau 34 et Figure 36).

Tableau 34 : Termes linguistiques correspondants à chaque partition d'un critère. Une partition correspond à un sous-ensemble flou.

Critère	Partition 1	Partition 2
Arôme	Végétal	Fruité
Structure	Léger	Corsé
Tanins	Fondus	Secs

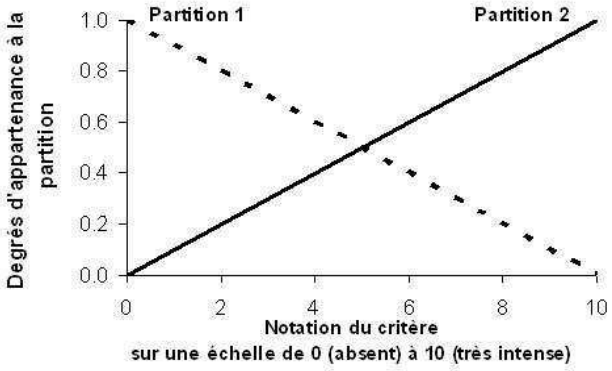


Figure 36 : Partitionnement flou des critères permettant de caractériser le type de produit. Chaque critère est partitionné en deux ensembles flous et noté de 0 à 10.

Les critères sont liés par des opérations de la logique floue qui interviennent sur les fonctions d'appartenances qui représentent les variables linguistiques (par exemple 'Végétal'). Pour agréger les critères et obtenir les types (Tableau 33), nous avons utilisé le produit comme opérateur. L'opérateur 'produit' nous permet d'obtenir un pourcentage d'appartenance à chaque type pour chaque couple parcelle-année avec la somme des pourcentages des différents types pour un couple 'parcelle-année' qui vaut 1 (soit 100%).

Le traitement des données permettant de caractériser chacun des trois critères (arôme 'Fruité', structure 'Corsé' et 'Tanins secs') sur une échelle de 0 à 10 montre que la gamme de variation de chaque critère est plus ou moins étendue : le critère 'tanins secs' montre la plus forte variation (entre 0.8 et 9.5) alors que le critère 'arôme fruité' ne varie qu'entre 1.5 et 7.1. Nous pouvons aussi observer une forte variation entre les parcelles pour une même année et entre les années pour une même parcelle (Tableau 35).

Tableau 35 : Évaluation sur une échelle de 0 à 10 des critères 'Fruité', 'Corsé' et 'Tanins Secs' par le jury de professionnels pour les parcelles d'étude en 2002 et 2005.

Parcelles	2002			2005		
	Fruité	Corsé	Tanins Secs	Fruité	Corsé	Tanins Secs
CHI1				3.1	4.6	7.7
CHI2	3.8	5.2	8.6	6.9	5.4	0.8
CHI3	3.8	5.7	8.1	4.6	4.6	5.4
CYR1				1.5	6.2	7.7
LAR1				4.6	7.7	5.4
LAR2	5.7	5.7	9.5	2.3	9.2	9.2
PAR1	7.1	8.1	8.6	5.4	7.7	8.5
RES1	4.3	4.3	9.0	3.1	3.1	3.1
RES2	5.0	6.2	7.3	5.4	8.5	5.4
SAV1	5.2	3.3	9.5	2.3	6.9	6.9
SNB1				4.6	4.6	2.3
SNB2	2.4	4.8	9.5	5.4	6.2	3.8
SOU1	4.8	6.7	8.1	5.4	8.5	9.2
SOU2	3.8	6.7	6.7	4.6	6.2	4.6

Un test de corrélation entre les trois critères montre que les p-values associées aux coefficients de corrélation de Pearson sont toutes supérieures à 0.30, le test n'est donc pas significatif, il n'y a pas de corrélations entre les trois critères (Tableau 36).

Tableau 36 : Coefficient de corrélations de Pearson (P-value) – coefficient de détermination (R^2), entre les trois critères (pour vingt-quatre couples 'parcelle-année').

	Fruité	Corsé
Corsé	0.148 (0.489) – 0.022	
Tanins secs	-0.217 (0.309) – 0.047	0.205 (0.336) – 0.042

Les valeurs des critères du tableau 35 ont été utilisées comme données d'entrée du système d'inférence floue (composé des six règles de décisions, tableau 33) ce qui nous a permis de calculer un pourcentage d'appartenance pour chaque couple 'parcelle-année' (Tableau 37). Chaque couple 'parcelle-année' appartient à plusieurs types. Pour chaque parcelle, la somme des pourcentages d'appartenance est égale à 100 % et le pourcentage d'appartenance moyen est égal à 17 % (cela correspond, arrondi à l'unité, au rapport entre la somme des pourcentages d'appartenance et le nombre de type). Certains couples présentent un type très majoritaire. Par exemple, LAR2 en 2005 est caractérisée par une forte appartenance au type 'Végétal - Corsé' ; cette parcelle a en effet une note 'Fruité' très faible (2.3, tableau 37) et une note pour le critère 'Corsé' très élevée (9.2) en 2005. Certains couples n'ont pas un type majoritaire. Les notations des critères des parcelles correspondantes sont en effet très proches de la valeur moyenne de 5. Par exemple, la parcelle SNB1 en 2005 est caractérisée par une forte appartenance à la fois au type 'Végétal - Léger' et au type 'Végétal - Corsé' ; cette parcelle est noté 4.6 pour les critères 'Fruité' et 'Corsé'. SAV1 en 2002 est caractérisée par une forte appartenance aux types 'Fruité - Léger – Tanins Secs' et 'Végétal - Corsé', ce type de parcelles pourrait ainsi correspondre au type 'intermédiaire' cité par les expert.

Les types 'Végétal – Corsé' et 'Végétal – Léger' sont plus représentés que les autres, et ceci quel que soit le millésime. Le Cabernet franc est un cépage connu pour avoir des notes végétales et notamment poivron vert pouvant être assez marquées.

Tableau 37 : Pourcentages d'appartenance de chaque couple 'parcelle-année' à chaque type de 'produit raisin/vin' en 2002 et 2005. FCS : 'Fruité - Corsé - Tanins secs', FCF : 'Fruité – Corsé - Tanins Fondus', FLS : 'Fruité - Léger - Tanins Secs', FLF : 'Fruité - Léger - Tanins Fondus', VC : 'Végétal - Corsé', VL : 'Végétal - Léger.

	2002						2005					
	FCS	FCF	FLS	FLF	VC	VL	FCS	FCF	FLS	FLF	VC	VL
CHI1	/	/	/	/	/	/	11	3	13	4	32	37
CHI2	17	3	16	3	32	29	3	34	2	29	17	14
CHI3	18	4	13	3	35	27	11	10	13	11	25	29
CYR1	/	/	/	/	/	/	7	2	5	1	52	33
LAR1	/	/	/	/	/	/	19	16	6	5	41	12
LAR2	31	2	23	1	24	18	20	2	2	0	71	6
PAR1	50	8	12	2	23	5	35	6	11	2	36	11
RES1	17	2	22	2	24	33	3	7	7	15	21	48
RES2	23	8	14	5	31	19	25	21	4	4	39	7
SAV1	17	1	33	2	16	32	11	5	5	2	53	24
SNB1	/	/	/	/	/	/	5	16	6	19	25	29
SNB2	11	1	12	1	36	40	13	20	8	13	28	18
SOU1	26	6	13	3	35	17	42	4	8	1	39	7
SOU2	17	8	8	4	41	21	13	15	8	10	33	21

Une comparaison des pourcentages d'appartenance entre les deux millésimes révèle une sensibilité au millésime plus ou moins importante suivant les parcelles. Nous avons calculé les écarts des pourcentages d'appartenance entre 2005 et 2002 et l'amplitude de ces écarts, pour chaque parcelle évaluée sensoriellement ces deux années (Tableau 38). L'amplitude varie de 15 % pour SOU2, parcelle que nous considérons peu sensible au millésime, à 68 % pour LAR2, parcelle très sensible au millésime.

Tableau 38 : Variations entre les pourcentages d'appartenance à chaque type de 'produit raisin/vin' en comparant 2005 à 2002. FCS : 'Fruité - Corsé avec - Tanins Secs', FCF : 'Fruité - Corsé - Tanins Fondus', FLS : 'Fruité Léger - Tanins Secs', FLF : 'Fruité Léger - Tanins Fondus', VC : 'Végétal - Corsé', VL : 'Végétal - Léger'.

	FCS	FCF	FLS	FLF	CCF	CLF	Amplitude
CHI1							
CHI2	-14	32	-13	27	-16	-15	47
CHI3	-6	6	0	8	-11	2	19
CYR1							
LAR1							
LAR2	-11	0	-22	-1	47	-12	68
PAR1	-15	-2	-1	0	12	5	27
RES1	-14	5	-16	12	-3	15	31
RES2	2	13	-9	-1	8	-12	25
SAV1	-6	4	-28	1	37	-8	66
SNB1							
SNB2	2	20	-4	12	-8	-22	42
SOU1	16	-3	-5	-2	4	-10	27
SOU2	-4	7	0	5	-8	0	15

Suivant l'analyse de consensus, il apparaît que, quelque soit le critère étudié, les juges du jury de professionnels ne sont pas consensuels (Figure 37). Des auteurs ont montré qu'il pouvait exister des désaccords entre les experts de la filière (Lesschaeve 2003; Cadot 2010). Ce manque de consensus peut être dû au fait que, d'une part les professionnels ne génèrent pas eux-mêmes leur vocabulaire et que, d'autre part, ils ne sont pas entraînés. Les termes peuvent alors être interprétés de manières différentes. Nous avons choisi de consolider la typologie en la croisant avec des données sensorielles dîtes de référence, obtenues à partir de l'évaluation d'un jury expert.

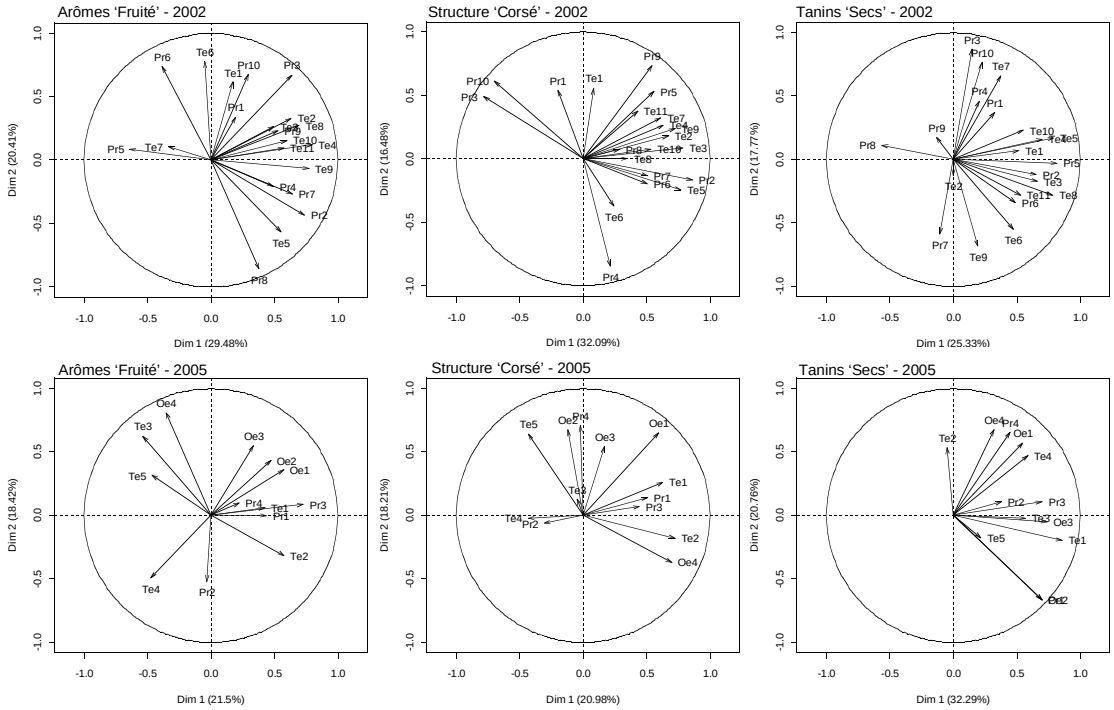


Figure 37 : Consensus entre les juges du jury de professionnels, pour chaque critère, évalué à partir d'une analyse en composante principale réalisée pour chaque critère et chaque année (2002 et 2005) en considérant les vins des parcelles comme des individus et les juges comme des variables.

3.3. Confrontation de la typologie des professionnels aux évaluations du jury expert

La typologie 'produit raisin/vin' est construite à partir de l'agrégation de trois critères issus de la caractérisation d'un jury de professionnels. Nous avons choisi de la confronter à des descripteurs sensoriels évalués par un jury expert pour enrichir la description de chaque type de produit et pour tester la robustesse de la caractérisation par un jury de professionnels.

Le nombre de couples 'parcelle-année' étant faible (vingt-quatre), la méthode statistique la plus appropriée, pour confronter la caractérisation sensorielle des professionnels et celle des experts, s'est avérée être la Régression Partial Least Squares (PLSR), en procédant à une validation croisée. La validation croisée consiste à utiliser vingt-trois couples 'parcelle-année' pour ajuster le modèle de régression et un couple pour le tester. Nous avons utilisé le package 'pls' v.2.1-0 de R (Mevik et Wehrens 2007), en utilisant l'algorithme traditionnel 'orthogonal scores' (Martens et Naes 1989). Les performances des PLSR ont été évaluées en calculant l'erreur quadratique moyenne (RMSE) de prédiction (Mevik et Cederkvist 2004), cet indice est exprimé dans la même unité que la variable simulée (Equation 7).

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{A}\sum_{i=1}^{A}(\widehat{y_i} - y_i)^2}$$

Equation 7 : Calcul de l'erreur quadratique moyenne (RMSE). $\hat{y}_i$: valeur prédite pour un couple 'parcelle-année', y_i : la valeur observée pour un couple 'parcelle-année' , i: couple 'parcelle-année' considéré et A: le nombre de couples 'parcelle-année'.

L'importance de chaque variable dans la prédiction peut être évaluée par le calcul de la valeur VIP. Celle-ci dépend de la variance expliquée par chaque composante, du poids des variables explicatives dans les composantes et des coefficients de ces variables dans la régression. Les valeurs VIPs ont été calculées suivant le script R implémentant la méthode de (Chong et Jun 2005). Selon Tenenhaus (1998), les variables sont considérées comme importantes pour la prédiction si la valeur de leur VIP est supérieure à 0.8.

Concernant les résultats obtenus, les PLSR calculées pour prédire chacun des six types en fonction des sept descripteurs sensoriels du jury expert présentent des valeurs de RMSE acceptables. Le RMSE maximal est de 13 % pour les types 'Végétal - Léger' (VL) et 'Végétal - Corsé' (VC) ; sachant que les pourcentages d'appartenance varient de 1 à 71 % pour notre jeu de données (Tableau 37).

D'après les valeurs des coefficients de la PLSR, les prédictions des deux types que nous pourrions qualifier d'extrêmes : 'Fruité - Corsé – Tanins Secs' (FCS) et 'Végétal - Léger' (VL), sont satisfaisantes. Le type FCS est ainsi associé à de forts coefficients pour les descripteurs 'Fraise' et 'Astringence' et de faibles coefficients pour les descripteurs 'Poivron' et 'Cuir/Animal'. Au contraire le type VL est associé à de faibles coefficients pour les descripteurs 'Fraise' et 'Astringence' et de forts coefficients pour les descripteurs 'Poivron' et 'Cuir/Animal'. Le type 'Fruité - Léger – Tanins Fondus' (FLF) est associé à un fort coefficient pour le descripteur 'Poivron'. Les parcelles présentent de faibles pourcentages d'appartenance à ce type. Le couple 'parcelle-année' CHI205 est celui qui a le plus fort pourcentage d'appartenance au type FLF, or la valeur du descripteur 'Poivron' est élevée pour ce couple 'parcelle-année', ce qui explique le fort coefficient du descripteur 'Poivron' pour le type FLF. Pour ce couple, il y a ainsi un désaccord entre les évaluations du caractère 'Fruité' des deux jurys. Les types 'Corsés' (FCF, FCS et VC) sont associés à de fortes valeurs des coefficients du descripteur 'Astringence'. Le descripteur 'Astringence' évalué par le jury expert et le critère 'Corsé' semblent associés. De même les descripteurs 'Gras/Dense' et 'Chaleur' sont associés aux types 'Fondus'. Le descripteur 'Amertume' semble, lui, associé aux types 'Fruités – Corsés' (FCS et FLS).

Tableau 39 : Valeurs des coefficients de la PLSR pour chaque type du jury de professionnels (JP) et pour chaque descripteur du jury expert (JE). FCS : type 'Fruité – Corsé – Tanins Secs', FCF : type 'Fruité – Corsé – Tanins Fondus', FLS : type 'Fruité – Léger – Tanins Secs', FLF : type 'Fruité – Léger – Tanins Fondus', VC : type 'Végétal – Corsé', VL : type 'Végétal – Léger'.

			Descripteurs JE						
		RMSE	Fraise	Poivron	Cuir / Animal	Amertume	Gras / Dense	Chaleur	Astringence
Types JP	FCS	12	0.40	-2.92	-2.28	-1.54	-0.27	-0.61	0.29
	FCF	8	0.71	1.03	0.21	0.75	1.12	1.21	0.24
	FLS	7	-1.35	-0.32	0.01	-0.99	-0.62	-0.65	-0.99
	FLF	6	0.56	3.11	0.89	0.7	0.97	0.57	-1.29
	VC	13	1.72	-1.27	-0.94	0.73	-0.36	-0.33	2.47
	VL	13	-1.35	0.86	1.65	0.12	-0.97	-0.83	-1.23

Les valeurs VIP permettent d'évaluer l'importance des variables dans la régression. Il apparaît que le descripteur 'Poivron' peut être important pour prédire les types 'Fruités'. Le descripteur 'Poivron' aurait un fort rôle quand il est peu présent, le type étant alors plutôt 'Fruité'. De même le descripteur 'Fraise' peut être important pour prédire les types 'Végétaux'. Les descripteurs auraient, dans ces cas-là, un rôle par défaut. Il faut noter que les descripteurs 'Poivron' et 'Fraise' ne sont pas corrélés (coefficient de Pearson de -0.170 et p-value de 0.426).

Tableau 40 : Valeurs des VIP de la PLSR pour chaque type du jury de professionnels et descripteurs du jury expert. FCS : type 'Fruité – Corsé – Tanins Secs', FCF : type 'Fruité – Corsé – Tanins Fondus', FLS : type 'Fruité – Léger – Tanins Secs', FLF : type 'Fruité – Léger – Tanins Fondus', VC : type 'Végétal – Corsé', VL : type 'Végétal – Léger'. Les valeurs en gras sont supérieures à 0.8, selon Tenenhaus (2005) les variables sont alors considérées comme importantes pour la prédiction.

		Descripteurs JE						
		Fraise	Poivron	Cuir / Animal	Amertume	Gras / Dense	Chaleur	Astringence
Types JP	FCS	0.26	**1.88**	**1.48**	**0.99**	0.17	0.39	0.19
	FCF	**0.84**	**1.22**	0.25	**0.89**	**1.33**	**1.44**	0.28
	FLS	**1.65**	0.39	0.01	**1.21**	0.76	0.79	**1.21**
	FLF	0.47	**1.71**	0.77	**1.00**	**0.82**	**0.96**	**0.82**
	VC	**1.30**	**0.96**	0.71	0.55	0.27	0.25	**1.86**
	VL	**1.23**	0.78	**1.5**	0.11	**0.88**	0.76	**1.12**

En attribuant des descripteurs aux types identifiés, la confrontation des évaluations des deux jurys permet d'enrichir la caractérisation faite par les professionnels. Les évaluations sont en accord pour les types 'Fruité – Corsé – Tanins Secs' et 'Végétal - Léger'. La confrontation permet donc aussi de valider la typologie réalisée par les professionnels pour la caractérisation de ces deux types.

Chapitre3. Correspondance entre itinéraires de fonctionnement et types de produits

Suite à la confrontation des évaluations du jury de professionnels et du jury expert, les descriptions des types que nous pourrions qualifier d'« extrêmes » 'Fruité - Corsé – Tanins Secs' (FCS) et 'Végétal - Léger' (VL) sont en accord (Partie 2. de ce chapitre). Nous avons positionné chaque couple 'parcelle-année' sur un graphique à deux dimensions avec en abscisse l'écart du pourcentage d'appartenance au type FCS par rapport au pourcentage moyen de ce type et en ordonnée l'écart du pourcentage d'appartenance au type VL par rapport au pourcentage moyen de cet autre type (Figure 38). Deux groupes (en grisés sur la figure) sont alors pris en compte : un groupe ayant une plus forte appartenance au type VL et une moindre appartenance au type FCS (soit neuf couples 'parcelle-année' : RES105, SNB202, CHI105, CYR105, SNB105, CHI305, SAV105, SOU205 et SNB205) et un groupe ayant une plus grande appartenance au type FCS et une plus faible au type VL (soit six couples : LAR105, LAR205, RES205, PAR105, SOU105 et PAR102). Suivant cette classification binaire 'VL ou FCS', neuf couples ne sont pas caractérisés, puisqu'ils n'ont pas à la fois une plus forte appartenance à un type et une moins forte appartenance à l'autre type (Figure 38).

Suivant ce regroupement, les parcelles sont essentiellement discriminées au cours du millésime 2005. Cela s'explique par le fait que le millésime 2005 a induit plus de variabilité entre parcelles, pour la contrainte hydrique.

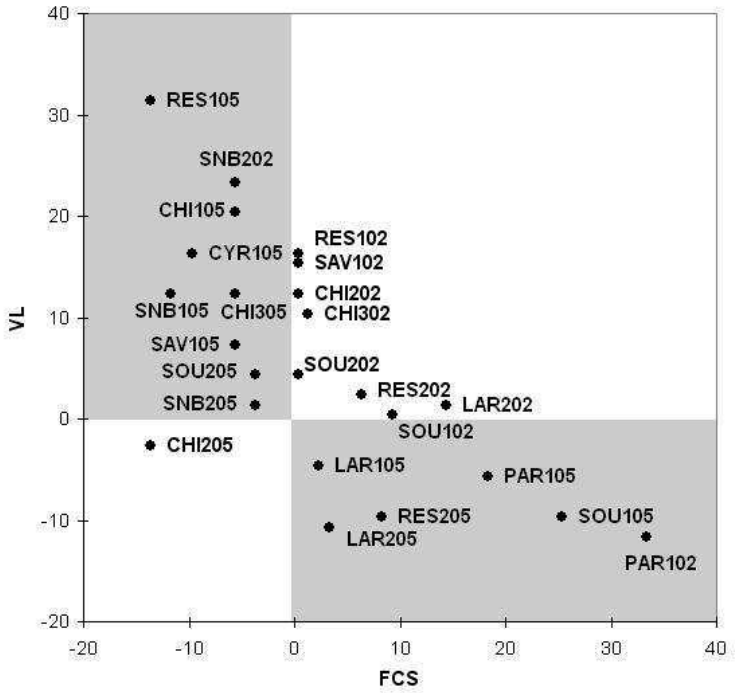


Figure 38 : Mise en relation de l'appartenance au type 'Fruité – Corsé – Tanins Secs' (FCS) et au type 'Végétal – Léger' (VL). Les valeurs correspondent à l'écart entre le pourcentage d'appartenance au type du couple 'parcelle-année' considéré et le pourcentage moyen d'appartenance au type pour l'ensemble des couples 'parcelle-année'.

Nous avons identifié seize itinéraires de fonctionnement différents pour les parcelles et les deux années de suivi (Partie 1. de ce chapitre). Ces itinéraires de fonctionnement correspondent à différentes combinaisons en termes de niveaux de développement végétatif et reproducteur, de précocité et de contrainte hydrique. Nous reprenons, ici, le tableau 30 et nous le complétons avec l'indication, pour chaque couple 'parcelle-année', du groupe de plus forte appartenance (soit le type FCS, qui représente également une moindre appartenance au type VL, soit le type VL, qui a le comportement inverse) (tableau 41). L'itinéraire de fonctionnement correspondant à la combinaison de DEV1, CHYD1 et PRE1, n'est pas représenté ici car le vin de la parcelle CHI1 n'a pu être dégusté en 2002. Nous avons de plus indiqué le type uniquement pour les parcelles répondant à notre critère de regroupement à savoir un pourcentage d'appartenance supérieur au type VL ou FCS et simultanément inférieur à l'autre. Les relations entre le fonctionnement et le type de produit ont ainsi pu être étudiées pour onze itinéraires de fonctionnement, ce qui reste satisfaisant.

Considérons, tout d'abord, les parcelles du groupe DEV2 (surface foliaire, poids de récolte, puissance, poids de bois de taille et rapport surface foliaire exposée potentielle / poids de récolte plus élevés). Il apparaît que les parcelles qui sont également plus tardives et montrant une contrainte hydrique moins forte sont plus associées aux vins de type 'Végétal - Léger' et moins à ceux de type 'Fruité – Corsé – Tanins secs'. Toutefois si la contrainte hydrique ou la précocité sont plus fortes, ce dernier type peut dominer.

Il est reconnu que les parcelles montrant une plus faible contrainte hydrique ont des arômes plus végétaux et moins fruités, citons (Chapman et al. 2005). Cortell et al. (2008) relèvent, par ailleurs, un plus faible niveau d'astringence pour des vignes avec une plus faible vigueur. Nous avons vu que le critère 'Corsé' des professionnels était lié au niveau d'astringence évalué par le jury expert.

Malgré une contrainte hydrique faible, si les parcelles sont précoces, le type FCS peut aussi dominer dans ce cas là. Toutes les parcelles d'étude, prises en compte dans cette thèse, étaient vendangées à un même niveau de maturité technologique (c'est à dire suivant uniquement la teneur en sucre et en acidité totale). Dans le cas de ces parcelles ayant un fort potentiel de développement végétatif et reproducteur, une plus forte précocité permettrait de vendanger des raisins ayant atteint des maturités aromatique et phénolique plus avancées. Fredes et al. (2010) indiquent, dans leur étude de l'équilibre entre le développement végétatif et reproducteur, pour le cépage Carmenère, que les vignes ayant un fort potentiel de développement végétatif et de production doivent être vendangées plus tardivement, car les techniques pour limiter le développement végétatif et favoriser le microclimat des grappes ne permettent pas une meilleure maturité des grappes. Par ailleurs, Chapman et al. (2004) notent une augmentation des arômes végétaux pour une plus forte production (qui se traduit dans leur étude par un nombre de bourgeons laissés à la taille supérieur). Ils indiquent une diminution de la perception des arômes fruités lorsque le développement végétatif est supérieur. A cause de phénomènes de masquage, les arômes végétaux, perceptibles à de faibles concentrations en molécules responsables, domineraient (Cain et Drexler 1974). Une période de maturation plus longue permet une plus forte dégradation des principales molécules responsables des arômes végétaux dont notamment la molécule 3-isobutyl-2-méthoxypyrazine (Allen et Lacey 1993). La période de maturation est allongée par une date de vendange plus tardive. Toutefois en vignobles septentrionaux, la date de vendange dépend souvent des conditions climatiques qui peuvent être défavorables. Dans ce cas, la date de vendange ne peut pas être retardée à cause du risque de pourriture grise.

Pour des parcelles très productrices, il est donc primordial de prendre en compte, d'une part, le niveau de contrainte hydrique, mais aussi, la précocité des parcelles. Une plus forte précocité peut permettre de produire un type 'Fruité – Corsé – Tanins Secs', par une dégradation plus forte des molécules responsables des arômes végétaux, malgré des conditions d'alimentation hydrique non contraignantes.

Considérons, maintenant, les parcelles du groupe DEV1 (rapport surface foliaire exposée potentielle / poids de récolte, poids de bois de taille, surface foliaire, poids de récolte et une puissance plus faibles). Ces parcelles donnent des vins plus caractérisés par le type 'Fruité – Corsé – Tanins Secs' et moins par celui 'Végétal – Léger' si la contrainte hydrique est faible. Toutefois si celle-ci est forte et la précocité élevée, le type peut être plus 'Végétal – Léger' et moins 'Fruité – Corsé – Tanins Secs' . Dans ce cas de contrainte hydrique forte, des blocages

physiologiques peuvent être observés car la photosynthèse est limitée. Ce phénomène peut être plus rapidement observé pour les vignes avec un faible développement végétatif. Une diminution des rendements permet toutefois de palier à ce phénomène (Van Leeuwen et al. 2003).

L'étude de ces deux premiers groupes de parcelles, montre l'importance de prendre en compte les différentes combinaisons entre variables de fonctionnement.

Il est plus difficile d'identifier une tendance pour les parcelles avec un plus fort développement végétatif et des poids de récolte plus faibles (groupe DEV2). Celles avec une faible contrainte hydrique ne sont pas caractérisées par un type 'Végétal – Léger' ou 'Fruité – Corsé – Tanins Secs' dominant. Les parcelles avec une contrainte hydrique plus forte peuvent, soit se rapprocher du type 'Végétal – Léger', soit plutôt du type 'Fruité – Corsé – Tanins Secs' .

Tableau 41 : Croisement des itinéraires de fonctionnement identifiés et des types de 'produit raisin/vin' FCS (plus 'Fruité – Corsé – Tanins Secs' et moins 'Végétal – Léger') et VL (plus 'Végétal – Léger' et moins 'Fruité – Corsé – Tanins Secs') des quatorze parcelles d'études. Seuls onze itinéraires de fonctionnement peuvent être caractérisés sensoriellement et uniquement dix-sept couples 'parcelle-année' ont une appartenance au type FCS ou VL bien identifiée.

		PRE1 Tardive	PRE2 Moyenne	PRE3 Précoce
DEV1 **PBT ↘↘** **SFE ↘↘** **RE ↘** **SFE/RE ↘↘** **PUI ↘**	**CHYD1**			LAR202 - **FCS** SOU102 - **FCS**
	CHYD2	RES205 - **FCS**		
	CHYD3		PAR105 - **FCS**	SAV105 - **VL**
DEV2 **PBT ↗** **SFE ↗** **RE ↘↘** **SFE/RE ↗** **PUI ↘↘**	**CHYD2**		CHI105 - **VL** RES105 - **VL** SNB205 - **VL** SOU105 - **FCS**	
	CHYD3		LAR205 - **FCS** SNB105 - **VL**	
DEV3 **PBT ↗** **SFE ↗** **RE ↗↗** **SFE/RE ↗** **PUI ↗**	**CHYD1**	CHI305 - **VL**	SNB202 - **VL**	PAR102 - **FCS**
	CHYD2		CYR105 - **VL** SOU205- **VL**	
	CHYD3	LAR105 - **FCS**		

L'analyse du lien entre le type de produit et les itinéraires de fonctionnement montre qu'il est difficile d'associer dans tous les cas un type de fonctionnement à un type de produit. Il est plus facile de mettre en évidence des liens entre itinéraires de fonctionnement et types de vin dans le cas de fonctionnements très tranchés d'un point de vue du développement végétatif et reproducteur (parcelles avec faibles ou forts développement végétatif et reproducteur).

Le rôle de la contrainte hydrique apparaît déterminant. La sensibilité des parcelles peut

s'évaluer en identifiant des itinéraires hydriques tenant compte de la réserve en eau maximale du sol et du mode d'entretien du sol. Pour cela, on peut calculer des bilans hydriques sur des années climatiques de référence (connues comme très sèches ou très humides). A partir de niveaux de développement végétatif et reproducteur et de précocité de développement plus favorables à la production de vins de type 'Végétal – Léger', une contrainte hydrique forte peut, dans certains cas, permettre d'aboutir à un type 'Fruité – Corsé – Tanins Secs'. A l'inverse, dans d'autre cas, plus favorables à la production de vins de type 'Fruité – Corsé – Tanins Secs', une contrainte hydrique forte peut aboutir à un type 'Végétal – Léger', en raisin de blocages physiologiques. Suivant les situations, l'impact de la contrainte hydrique, sur le type de produit obtenu, est donc variable.

De manière plus générale, nous avons pu mettre en évidence que les parcelles sont plus ou moins sensibles au millésime et donc aux caractéristiques climatiques. Ceci, que ce soit en terme de fonctionnement de la vigne, comme avaient pu le montrer Barbeau et al. (1998) ou, en terme de caractérisation sensorielle globale des vins qui en sont issus. Les types de fonctionnement identifiés dépendent à la fois des caractéristiques des parcelles et des conditions climatiques. Il apparaît que la sensibilité des parcelles au millésime, fonction des caractéristiques de celles-ci, doit être prise en compte.

Les résultats présentés dans cette partie, valident donc le concept d'itinéraire de fonctionnement qui vise à d'abord caractériser une origine écophysiologique (déterminée suivant la prédiction de variables dépeignant le niveau de développement et la précocité des parcelles) et évaluer, ensuite, la diversification de l'itinéraire de fonctionnement suivant les conditions d'alimentation hydrique. Ils montrent qu'il est possible de décrire des potentialités en termes de types sensoriels de produit (suivant les potentialités de développement végétatif et reproducteur et de précocité) mais aussi de montrer que les potentialités varient suivant les conditions climatiques.

Actuellement les années à forte contrainte hydrique sont moins nombreuses que celles présentant une faible contrainte hydrique. En caractérisant les itinéraires de fonctionnement, il est possible d'identifier les parcelles qui vont le plus souvent produire un type de vin ou l'autre ('Végétal – Léger' ou 'Fruité – Corsé – Tanins Secs'). Ces résultats soulignent donc la possibilité que des parcelles jusqu'alors dîtes moins qualitatives, car produisant le plus souvent un type 'Végétal – Léger', pourraient être les parcelles les plus qualitatives dans le futur. A l'opposé les parcelles les plus souvent qualitatives de nos jours, ne permettraient plus d'obtenir des vins aux caractéristiques sensorielles recherchées.

Grâce à ces résultats, nous avons donc pu valider notre hypothèse qui consistait à affirmer que les types de produit peuvent être prédits en fonction des itinéraires de fonctionnement identifiés.

Ces résultats montrent aussi qu'il est nécessaire de prendre en compte le poids de récolte dans la caractérisation des itinéraires de fonctionnement. Les variables composites

construites à partir de l'agrégation de variables caractérisant les facteurs du milieu et les pratiques permettent de prédire un potentiel de développement végétatif et reproducteur, toutefois la gestion du rendement doit donc aussi être retenue comme variable explicative.

De nombreuses études mettent en relation des caractéristiques du milieu, des variables de fonctionnement de la vigne ou des pratiques agro-viticoles avec des descripteurs sensoriels du vin, citons (Falcao et al. 2007; Cortell et al. 2008; Bramley et al. 2011). A notre connaissance aucune étude n'a mis en relation de manière globale le fonctionnement de la vigne et les caractéristiques sensorielles du vin. Nos travaux constituent donc un premier pas vers une caractérisation systémique de l'élaboration de la qualité du raisin et du vin, en proposant une méthode prenant à la fois en compte le fonctionnement de la vigne au cours de son cycle végétatif et le type de produit obtenu.

Partie 4 . Discussion générale et perspectives

Partie4. Discussion générale, perspectives

Dans ce chapitre, nous rappelons les objectifs de la thèse (Partie 1.) puis les principaux résultats présentés et discutés dans les chapitres précédents. Nous présentons les différents apports et limites de cette thèse en termes méthodologiques et pour l'agronomie (Partie 2.). Nous discuterons enfin des perspectives à la fois de recherches et opérationnelles de ce travail (Partie 3.).

Chapitre1. Rappels des objectifs de la thèse

Dans le cadre de ce travail, nous avions défini la question de recherche suivante : **Comment modéliser le fonctionnement de la vigne afin d'optimiser les pratiques culturales et d'avoir une meilleure maîtrise du type de vin obtenu ?**

Notre objectif général visait à élaborer et appliquer une méthode de caractérisation systémique du fonctionnement de la vigne à partir des effets combinés du milieu et des pratiques culturales pour prévoir les types de vins.

Cette thèse contribue au problème général de l'étude du concept 'terroir' dans son sens large, suivant la dernière définition proposée par l'OIV en 2010 ; c'est à dire en prenant en compte l'ensemble des facteurs du système impliqués : facteurs du milieu, facteurs humains et qualité des produits. Une des originalités de cette étude a donc consisté à considérer le système vigne, exhaustivement, de la parcelle au produit fini.

Nous avions émis l'hypothèse qu'il était possible d'analyser et modéliser le fonctionnement de la vigne en fonction des effets couplés des facteurs du milieu et des pratiques afin de relier son influence aux caractéristiques sensorielles du vin.

Le premier objectif a consisté à représenter conceptuellement l'effet des facteurs du milieu et des pratiques culturales sur le fonctionnement de la vigne et le type de 'produit raisin/vin'. Pour cela, nous avons proposé le **concept d'itinéraire de fonctionnement** qui représente le modèle conceptuel sur lequel nous nous sommes appuyés. Celui-ci a consisté à caractériser, dans un premier temps, les impacts couplés des facteurs physiques du milieu, qui sont stables, et des pratiques culturales pérennes, sur la **vigueur** et la **précocité** de la vigne. Le second objectif a été de construire et appliquer une méthode permettant de prédire la vigueur et la précocité de la vigne, en fonction des facteurs du milieu et des pratiques connus, pour rendre le modèle opérationnel. Ensuite, nous avons considéré que le niveau de **contrainte hydrique** appliqué à la vigne amène à une diversification des itinéraires de fonctionnement.

Nous avons appliqué le concept d'itinéraire de fonctionnement à un ensemble de parcelles d'étude pour deux années aux conditions climatiques suffisamment contrastées pour notre étude. Nous avons ainsi pu répondre à notre troisième objectif qui visait à relier des itinéraires de fonctionnement et des **types de 'produit raisin/vin'**.

Chapitre2. Apports et limites de notre démarche

1. Sur le choix du mode de conceptualisation et du type de modélisation

La modélisation permet de mieux comprendre le fonctionnement des systèmes complexes. Bouleau (1999) précise que « les modèles sont des représentations partisanes, au bon sens du terme, c'est à dire qu'au sein de multiples possibilités d'expression et de représentation, ils sont le choix d'un parti ». Nous avons choisi le parti qu'il était possible de définir un nouveau cadre conceptuel et une nouvelle démarche opérationnelle pour modéliser le fonctionnement de la vigne. Les modèles de fonctionnement de type mécaniste ont montré leurs limites pour un usage à l'échelle de la parcelle et dans un objectif d'utilisation comme outils d'aide à la décision pour adapter les pratiques et le type de vin à produire. Une démarche plus simple paraît suffisante.

L'objectif et l'usage d'un modèle guident le choix des variables prises en compte et des processus de modélisation (Cros et al. 2003). Lamanda et al. (2011) ont récemment proposé un protocole pour la conceptualisation d'un agro-système. Ces auteurs soulignent le besoin de conceptualiser le système étudié pour (i.) améliorer la formalisation des connaissances, l'acquisition des données et leur analyse, (ii.) définir des protocoles à l'échelle de la parcelle pour les systèmes complexes et (iii.) identifier des manques de connaissances. L'itinéraire technique correspond à la combinaison des techniques mises en œuvre sur une parcelle, en vue d'en obtenir une production (Sebillotte 1974). Nous avons proposé le concept d'itinéraire de fonctionnement qui correspond à la **combinaison des effets des pratiques à ceux des facteurs du milieu**, sur le développement de la vigne et donc sur les caractéristiques du raisin et du vin. Ce concept permet, dans un premier temps, de considérer de manière conjointe les pratiques et les facteurs du milieu et, dans un second temps, de caractériser le fonctionnement de la vigne. De plus, la méthode originale développée, permet d'expliquer deux observations :

- Une parcelle, avec ses propres facteurs du milieu, peut représenter plusieurs itinéraires de fonctionnement en raison de la variabilité des pratiques pérennes, des pratiques annuelles et du climat. Ainsi, sur un même lieu géographique des raisins et des vins aux caractéristiques variées peuvent être produits, suivant l'adaptation des pratiques et les conditions climatiques.
- Des combinaisons différentes entre facteurs du milieu et pratiques peuvent induire un même fonctionnement de la vigne. Ainsi des localisations géographiques diverses, avec des facteurs du milieu différents, peuvent produire des raisins et des vins aux caractéristiques identiques.

La formalisation du modèle conceptuel, que nous proposons, permet donc de poser les bases de la construction d'un outil d'aide à la décision pour les viticulteurs. Cet outil leur permettra d'optimiser leur pratiques aux facteurs du milieu et suivant leur objectif de production.

Elle peut aussi servir, lors de travaux de recherche, à tester des scénarios prospectifs, dans le cadre d'un contexte réglementaire et climatique changeant, pour proposer des voies d'adaptation aux viticulteurs.

Dans le cadre de nos travaux, les facteurs humains interviennent car ce sont les viticulteurs qui appliquent les pratiques culturales sur les parcelles. Comme déjà évoqué au Chapitre 1., nous n'avons pas pris en compte le sous-système décisionnel du système de production (Le Gal., 2009). Nos résultats montrent toutefois des niveaux d'adaptation plus ou moins importants des pratiques. Le modèle doit prendre en compte des niveaux d'adaptation différents. Par exemple, les techniciens de la cave coopérative, avec laquelle nous avons collaboré, ont mis en évidence le rôle de la fertilisation et nous ont indiqué des cas de sur-fertilisation. Nous avions considéré, dans notre démarche, que le viticulteur adaptait sa fertilisation pour compenser une carence éventuelle. Nous avons donc vu que cette variable, plus ou moins bien adaptée, devait être prise en compte.

Plus généralement, nous disposons de bases de données caractérisant les pratiques que mettent en œuvre les viticulteurs, mais il serait nécessaire aussi de connaître les raisons des choix décisionnels des viticulteurs. Ces travaux sont réalisés à partir de données issues de parcelles de viticulteurs, cette connaissance permettrait d'affiner la sélection des parcelles prises en compte dans les travaux de modélisation du fonctionnement de la vigne. Cela permettrait aussi de mieux expliquer les relations entre les variables du système, identifiées par des apprentissages automatiques à partir des données issues des parcelles.

2. Sur l'utilisation des systèmes d'inférence floue

La méthode a été construite en deux étapes : tout d'abord une caractérisation de l'effet des facteurs du milieu puis, ensuite, une caractérisation de l'effet des pratiques.

Les systèmes d'inférence floue (SIF) intègrent de la connaissance et de l'évaluation experte. Cela permet de s'affranchir des mesures concernant les variables du milieu et de les remplacer par des classes linguistiques du type 'Faible / Fort' directement repérées par l'expert.

Les SIF utilisent des règles facilement compréhensibles et interprétables « Si la *Réserve en eau maximale du sol* est faible et si le *Pourcentage de cailloux sur le profil* est élevé et si la *Roche-mère* est dure alors le *niveau de vigueur* lié aux facteurs du milieu est minimum». Ils permettent de prendre en compte une pondération entre variables. Nous avons choisi d'avoir des valeurs de sortie numériques. Toutes les variables composites caractérisant les effets des facteurs du milieu : la vigueur liée aux facteurs du milieu (VIG_MIL), le pédoclimat (PED), le mésoclimat (MES) et la précocité liée aux facteurs du milieu (PRE_MIL); sont évaluées par un SIF sur une échelle continue de 1 (faible) à 3 (fort). La variable caractérisant les effets des facteurs du milieu et des pratiques (VIG_ITK) est évaluée sur une échelle de 1 à 4.

Pour construire les SIF permettant de prédire les variables caractérisant les effets des

facteurs du milieu, nous avons réutilisé les variables d'entrée et les règles de décision identifiées par Morlat (2001). L'évolution du mode de calcul a permis d'obtenir, désormais, des prédictions automatisées. L'adaptation, des paramètres des partitions des variables d'entrée, à la zone étudiée remplacent le choix des bornes des classes de discrétisation des variables continues. Ce choix était précédemment réalisé uniquement par expertise. Cette adaptation est désormais facilitée par des méthodes statistiques mises en œuvre sur les données issues du terrain étudié. De plus, le principe de partitionnement des variables en ensembles flous permet de prendre en compte l'incertitude sur les données d'entrée par un passage progressif d'une classe à l'autre.

Cette démarche est très bien adaptée à une cartographie des facteurs du milieu d'une région viticole. Dans cet objectif, nous avons identifié le besoin d'une adaptation des paramètres à la zone étudiée. Toutefois, une adoption de paramètres communs à plusieurs vignobles est aussi nécessaire pour pouvoir comparer différentes zones. Actuellement, une vigueur estimée comme forte, pour un vignoble, peut en effet correspondre à une vigueur estimée comme moyenne, pour un autre vignoble, étant données des bornes de partitions différentes. Par exemple, suivant l'ancienne méthode de calcul, la réserve en eau du sol est jugée faible en dessous de cinquante millimètres et forte au dessus de cent millimètres pour les zones de l'Anjou et du Saumurois et faible en dessous de cent millimètres et forte au dessus de cent cinquante millimètres pour la zone de Chinon. Ces choix méthodologiques, permettant une plus grande précision à l'échelle de la zone étudiée, doivent être bien connus, notamment dans le cas d'un regroupement de bases de données cartographiques. A chaque étape d'agrégation spatiale des données, par exemple s'il fallait agréger les données de trois régions viticoles cartographiées de l'Anjou, du Saumurois et du Chinonais, nous suggérons de recalculer les variables composites en adaptant les paramètres des partitions. Mais, les règles de décisions qui agrègent les termes linguistiques et dont les conclusions aboutissent à un niveau chiffré de la variable composite, restent toujours génériques.

Les variables composites prédites peuvent permettre d'adapter les pratiques culturales, notamment pour le choix du porte-greffe et du mode d'entretien du sol. Cependant, il peut exister des interactions entre les facteurs du milieu et les pratiques. Nous avons évalués les interactions dans un second temps.

Certaines pratiques n'ont pas été prises en compte. Soit, car elles sont fixées par les cahiers des charges des AOC sur la zone étudiée, mais les règles varient d'un cahier des charges à l'autre. Soit, car elles sont difficiles à obtenir à une large échelle, comme cela a été le cas pour la fertilité chimique des sols. Cette fertilité correspond à la fertilité naturelle et aux apports du viticulteur. Seules des analyses de sols ou des mesures via le végétal, peuvent indiquer le niveau de fertilité d'une parcelle.

La méthode, permettant d'évaluer les interactions entre les facteurs du milieu et les pratiques culturales, a été élaborée pour la variable composite 'vigueur' (Chapitre 2., partie 2.).

Pour cela, trois variables d'entrée ont été retenues : la vigueur liée aux facteurs du milieu (variable construite Chapitre 2., partie 1.), la vigueur conférée par le porte-greffe et l'effet du mode d'entretien du sol sur la vigueur. La vigueur observée, par un expert, a servi de donnée d'apprentissage. Nous avons utilisé une base initiale de cent cinquante deux parcelles. Il s'est avéré qu'une première étape de sélection de données d'apprentissage était nécessaire, comme le recommandait Taskin (2009). Cette étape a toutefois conduit à diminuer la variabilité du jeu de données. Les parcelles plantées avec un porte-greffe qui confère le plus faible niveau de vigueur, mais peu présentes sur la zone étudiée, ont ainsi été éliminées lors du processus de sélection.

Le viticulteur adapte ses pratiques culturales en fonction de la perception qu'il a de son milieu et du type de vin qu'il souhaite produire. Les premiers résultats ont mis en évidence que les données utilisées présentaient un niveau d'adaptation des pratiques au milieu plus ou moins important. Les facteurs du milieu et les pratiques ne sont pas indépendants dans nos bases de données. Les combinaisons ne sont pas aléatoires mais sont issues du choix du viticulteur. Bodin (2003) a étudié l'adaptation des pratiques culturales à différentes unités terroir de base. Cet auteur montre qu'il n'y a pas d'association significative des pratiques culturales et des unités terroir de base, les viticulteurs adaptent préférentiellement leurs pratiques en fonction de leur objectif de production. Cette constatation rejoint la remarque que nous faisions précédemment concernant le besoin de connaître aussi les choix décisionnels du viticulteur dans le processus de modélisation du système à partir de données réelles.

Nous avons mis en évidence des relations connues comme un niveau de vigueur plus élevé pour des parcelles non enherbées, ce qui valide notre démarche de modélisation. Par contre, nous avons surtout mis en évidence la présence d'interactions qui peuvent expliquer des relations *a priori* en contradiction avec les connaissances expertes et celles issues de la bibliographie, si on considère uniquement la relation entre une des variables d'entrée (le porte-greffe) et la variable de sortie (le niveau de vigueur). Ces relations sont de deux ordres : des interactions entre les variables étudiées et des interactions avec des facteurs non pris en compte. En prenant en compte ces deux types d'interactions, la démarche que nous avons entreprise dans nos travaux peut permettre d'affiner l'adaptation des pratiques.

Le système construit a pu être validé à partir de données qui n'avaient pas servi à le construire. Toutefois lorsque nous l'avons testé sur les données des quatorze parcelles d'étude prises en compte, les résultats n'ont pas été satisfaisants. Cela peut s'expliquer par le fait qu'onze parcelles n'étaient pas enherbées et que les règles de décision avaient essentiellement été construites pour des parcelles enherbées.

Cette construction du modèle opérationnel ne constitue qu'une première étape. Elle a toutefois permis de construire et de valider la méthodologie d'agrégation des variables et d'extraction de connaissances, et de mettre en évidence des interactions entre le sol/sous-sol, le porte-greffe et le mode d'entretien du sol.

Nous avons ainsi pu montrer qu'il était possible de modéliser un système complexe, avec des données obtenues en conditions réelles, sur des parcelles, de viticulteurs, en production. La méthode mathématique d'extraction de connaissance utilisée, basée sur des systèmes d'inférence floue et un couplage avec de l'expertise, permet de valoriser des bases de données existantes. L'extraction de connaissance à partir de bases de données est une approche complémentaire aux expérimentations. Les informations sont moins précises mais la démarche permet de prendre en compte un large ensemble de facteurs et de développer une approche système.

Dans l'objectif de construire un modèle générique, cette démarche nécessite d'être étendue, notamment à la variable précocité, et aux données de plusieurs autres vignobles.

3. Sur la caractérisation du 'produit raisin/vin'

Nous avons construit une typologie du produit à partir de l'expertise de professionnels de la région. Les professionnels ont directement caractérisé le produit final. Huit types de produits ont été identifiés. Nous n'avons pas pris en compte dans nos travaux le type 'intermédiaire' et le type 'altéré'. Trois critères permettent de caractériser les six autres types : l'arôme (de végétal à fruité), la structure (de léger à corsé) et la qualité des tanins (de fondus à secs). Cette typologie est indépendante des catégories de vins liées à des AOC différentes. Cette typologie peut correspondre à l'image conceptuelle qu'ont les professionnels des types de vins rouges pouvant être produits avec le cépage Cabernet franc, en Val de Loire.

La typologie 'produit raisin/vin' peut être considérée comme une évaluation de la qualité potentielle du produit, lorsque qu'elle est prédite suivant le fonctionnement de la vigne sur une parcelle.

Pour définir les différents types de 'produit raisin/vin' issus du Cabernet franc, et en considérant la production de vin rouge, un consensus a été facilement trouvé entre les professionnels de la filière interrogés. Par contre, lorsque nous avons analysé les résultats des dégustations d'un groupe de professionnels (différents des précédents), il est apparu qu'ils n'étaient pas consensuels pour évaluer les critères caractérisant chaque type. Les croisements des résultats de leur dégustation avec les évaluations sensorielles obtenues par un jury expert, considérées comme une référence, ont montré une caractérisation satisfaisante uniquement pour les deux types les plus extrêmes : 'Végétal - Léger' et 'Fruité - Corsé - Tanins secs'. Nous pouvons alors nous demander s'il ne faudrait pas entraîner les jurys de professionnels pour obtenir une évaluation consensuelle. Ce résultat revient aussi à se questionner sur le nombre de types de 'produit raisin/ vin' à prendre en compte dans le cadre d'une modélisation systémique.

Dans le cadre d'une viticulture de terroir, nous pouvons aussi nous demander quelle généricité peut être attribuée à cette typologie (généricité 'spatiale' et généricité 'temporelle').

En Anjou, plusieurs AOC peuvent être produites sur une même parcelle. Au moment de

la plantation de sa parcelle et lors de la mise en œuvre de ses pratiques culturales, le viticulteur choisit le style de vin qu'il produira. La typologie que nous avons construite pour les vins rouges de Cabernet franc peut permettre d'orienter vers un type d'AOC ou un autre. Nous pouvons notamment citer le cas des vins rouges AOC Anjou et Anjou-Villages. Le vin AOC Anjou rouge est qualifié de 'fruité et printanier', 'frais' et 'très aromatique', 'aux notes de bonbons anglais lorsqu'il est vinifié en primeur', par contre le vin AOC Anjou-Villages rouge est qualifié de 'profond et intense, charpenté et charnu' avec une 'robe profonde de couleur rubis, des notes fines de fruits rouges et de fleurs évoluant vers des arômes complexes, la bouche est parfois fraîche aux tanins fins, mais plutôt ample et charnue' (Source : Vins de Loire). Ces deux types ont donc des caractéristiques sensorielles propres. Les limites entre la caractérisation sensorielle des AOC ne sont toutefois pas clairement définies, un gradient de typicité doit être considéré, en sous-entendant qu'une zone 'sensorielle' peut être plus ou moins commune entre deux AOC (Ballester et al. 2005; Cadot 2011). Lors d'une étude visant à évaluer la typicité de vins Anjou rouge et Anjou-Villages Brissac, Cadot (2010) met en avant, par exemple, le caractère discriminant du descripteur 'Astringence', entre les typicités des deux AOC, les vins AOC Anjou rouge étant plus astringents. Nous pouvons toutefois nous demander quel peut être l'usage d'une telle typologie pour une région produisant uniquement une AOC. Nos travaux doivent être couplés à des travaux caractérisant la variabilité sensorielle qui peut exister au sein d'une zone viticole, en supposant que cette variabilité peut être plus ou moins importante. De plus, certains critères peuvent être plus discriminants que d'autres. Les travaux de Courtin et al. (2006) discriminent par exemple les types de vins de l'AOC Chinon uniquement suivant leur structure.

La question de généricité de la typologie 'produit raisin/vin' se pose quant à son application à d'autres vignobles mais aussi quant à son application pour différents millésimes. Cadot (2010) prédit une note de typicité en fonction des descripteurs sensoriels. Il apparaît que les descripteurs visuels sont les plus explicatifs et les seuls à être stables d'un millésime à l'autre.

4. Sur la prédiction du type de 'produit raisin/vin'

Nous avons jeté les bases méthodologiques qui permettent de construire un modèle générique apte à caractériser le fonctionnement de la vigne d'une parcelle et lier ce dernier au type de produit 'raisin/vin'.

En utilisant les données de quatorze parcelles d'étude nous avons pu valider la démarche méthodologique. Comme nous venons de l'évoquer dans la partie précédente, la typologie 'produit raisin/vin' n'a pu être validée que pour les deux types les plus extrêmes 'Végétal – Léger' et 'Fruité – Corsé - Secs'. Cette validation a été réalisée grâce au croisement entre les données sensorielles obtenues par deux jurys : un jury de professionnels et un jury expert, ce dernier étant considéré comme référence. Dans le cadre de travaux de modélisation,

ce résultat montre le besoin de confronter les résultats issus d'expertises à des données observées expérimentalement.

Nous avons caractérisé le fonctionnement de la vigne dans les parcelles d'étude, d'un point de vue de sa vigueur et de sa précocité. Il est toutefois apparu qu'il fallait aussi prendre en compte la quantité de raisins produits. Même si les pratiques culturales, mises en œuvre sur les parcelles d'étude, visaient à homogénéiser la charge en fruits, à travers une gestion de la taille et de l'éclaircissage, une forte variabilité des rendements a été observée entre parcelles. Les rendements des parcelles élémentaires gérées par l'INRA ont aussi pu dépasser les seuils de rendement fixés par les cahiers des charges des AOC. Ce phénomène a déjà été observé lors de suivis de parcelles et a été expliqué par des phénomènes de compensation induisant des grappes plus volumineuses, phénomène variable suivant les milieux (Morlat 2010). La quantité de raisins doit être gérée en fonction de la vigueur de la parcelle (Carbonneau et al. 2007). De nombreux auteurs soulignent l'importance de la gestion du rapport entre la surface foliaire et la charge en fruits, citons (Dufourcq et al. 2005; Kliewer et Dokoozlian 2005; Etchebarne et al. 2010). Le modèle de fonctionnement de la vigne, basé sur le concept d'itinéraire de fonctionnement, est composé de plusieurs sous-systèmes d'inférence floue (SIF). Nous avons développé la méthode en construisant notamment les systèmes permettent de prédire la vigueur de la vigne. Il apparaît donc nécessaire de considérer aussi le rendement de la parcelle.

En croisant les itinéraires de fonctionnement identifiés avec les deux types validés, nous avons mis en évidence les relations à intégrer dans un futur outil d'aide à la décision. Nous avons disposé du suivi de la vigne pour deux années aux conditions climatiques contrastées. Le millésime 2005 était un millésime avec une faible pluviométrie. Les parcelles ayant une réserve en eau utile maximale faible avaient subi une forte contrainte hydrique lors de ce millésime. La contrainte hydrique peut permettre de produire des vins du type 'Fruité – Corsé – Secs' dans le cas de parcelles tardives, avec un fort développement végétatif et reproducteur qui produiraient plutôt, lors de millésimes avec une contrainte hydrique plus faible, un type 'Végétal – léger'. A l'inverse, des parcelles avec un faible développement végétatif et reproducteur et précoces qui produiraient plutôt un type 'Fruité – Corsé – Secs' pourraient produire un type 'Végétal – Léger' si la contrainte hydrique est forte, en raison d'une forte diminution de la photosynthèse induisant des blocages physiologiques.

Étant donné les facteurs du milieu, certaines parcelles ont un comportement qui peut varier fortement d'une année à l'autre (Barbeau, Asselin, et al. 1998; Bodin 2003). Les parcelles sont plus ou moins réactives en fonction du millésime. Nous avons mis en évidence que cette réactivité se traduisait au niveau du fonctionnement de la vigne mais aussi au niveau de celui des types de 'produit raisin/vin' obtenus. Les parcelles très réactives au millésime présentent une plus forte variabilité de leurs caractéristiques sensorielles d'une année à l'autre. La caractérisation des itinéraires de fonctionnement doit prendre en compte cette réactivité au millésime et, dans le cadre de travaux de modélisation, nous avons suggéré de retenir des

années de référence. Celles-ci peuvent facilement être identifiées sur un vignoble (Coulon et al. 2011). La méthode que nous avons proposée utilise des variables climatiques calculées en fonction des états de développement de la vigne, ce qui permet de caractériser finement les types climatiques dans le cadre des études sur le fonctionnement de la vigne.

Nous avons validé la caractérisation du fonctionnement en deux étapes. Une première étape qui consiste à caractériser le fonctionnement de la vigne d'un point de vue de sa vigueur mais aussi de celui de son potentiel de production. Une seconde étape qui caractérise la contrainte hydrique de la vigne. Cette deuxième étape s'appuie sur l'utilisation de modèles de bilans hydriques existants. Nous recommandons l'usage du modèle construit qui considère la part d'eau consommée par l'enherbement et la quantité d'eau ruisselée lors d'un événement pluvieux (Gaudin et al.; Celette et al. 2010). La prise en compte de l'effet du millésime sur la maturation des raisins peut être réalisée par couplage avec des modèles existants (Fernandez Martinez et al. 2012). Nous avons apporté notre contribution à la première étape en posant les bases méthodologiques pour construire le modèle qui serait composé de plusieurs systèmes d'inférence floue. Mais, nos travaux n'ont pas permis d'obtenir déjà un modèle global opérationnel.

Nous avons montré qu'il était possible de relier des itinéraires de fonctionnement à des types de 'produit raisin/vin'. Nous n'avons pas considéré dans nos travaux, la date de vendange. Nous admettons toutefois qu'une parcelle peut permettre, suivant la date de vendange, de produire plusieurs types de 'produit raisin/vin', et d'autant plus que les parcelles sont précoces. La date de vendange doit être prise en compte dans l'objectif de construire un futur outil d'aide à la décision ou d'analyser des scénarios prospectifs. Il est judicieux d'identifier les parcelles aptes à ne produire qu'un type de vin de celles aptes à produit une gamme de produits. Cette identification permet d'évaluer les marges de manœuvre dont dispose le viticulteur pour répondre à ses objectifs de production en termes de gamme de types de produit et de volume produit par type.

Chapitre3. Perspectives

Ces travaux de recherche posent les bases de la construction d'un outil d'aide à la décision pour les viticulteurs. Cet outil doit leur permettre de mieux adapter leurs pratiques aux facteurs du milieu des parcelles et à leurs objectifs de production. En fonction de la caractérisation du fonctionnement d'une parcelle, dépendant des facteurs du milieu et des pratiques culturales pérennes mises en œuvre, l'outil doit aider le vigneron dans le choix du type de vin à privilégier sur une parcelle en production. Il doit aussi permettre de mieux adapter le choix des pratiques pérennes lors de la plantation d'une parcelle. Cet outil permettrait donc une meilleure maîtrise du type de produit obtenu et une valorisation maximale des potentialités des facteurs du milieu (selon les contraintes socio-economiques).

Les vignerons ont un type de vin comme objectif. Pour eux, le sol serait l'élément le plus influant sur le type de vin (Cadot et al. 2012). Toutefois le lien entre la représentation conceptuelle de leur produit et la représentation perceptuelle, c'est-à-dire ce qu'ils veulent produire et ce qu'ils produisent, met en évidence le rôle des pratiques et notamment des pratiques œnologiques (sur lesquelles les viticulteurs ont une meilleure maîtrise et peuvent agir plus vite) (Cadot 2010). Mieux comprendre la construction dynamique du rendement et de la qualité du raisin à travers l'analyse du fonctionnement de la vigne pourra permettre aux vignerons de réduire l'écart entre ces deux représentations, en adaptant au mieux leurs pratiques culturales.

Bien que le modèle présenté n'intègre pas les bio-agresseurs dans le système, il peut participer à la gestion de la pression parasitaire par une meilleure connaissance de l'environnement constitué des facteurs du milieu physique et des facteurs anthropiques à travers les pratiques culturales, en combinaison avec le type de millésime. La vigueur de la vigne est généralement favorable à certaines maladies. Aussi, une vigne vigoureuse sera plus sensible au mildiou, le microclimat étant plus favorable au développement du champignon et à une proportion plus importante de jeunes feuilles sensibles sur les ramifications secondaires (Valdes et al. 2005; Calonnec et al. 2009). La gestion en amont de la vigueur grâce à la modélisation du fonctionnement de la vigne peut donc contribuer à évoluer vers des pratiques en adéquation avec les recommandations de l'agro-écologie (Dalgaard et al. 2003).

Depuis maintenant au moins deux décennies, le climat change et l'agriculture doit s'adapter (GIEC 2007; Trnka et al. 2011). Sadras et Petrie (2011) indique qu'une maturité plus précoce des baies due aux températures plus élevées s'explique avant tout par un début plus précoce de la période de maturation et non à une augmentation plus importante de l'accumulation du sucre au cours d'une période de maturation de même durée. Ces travaux indiquent que la mise en œuvre de pratiques culturales pour retarder la période de maturité peut être efficace en réponse aux évolutions climatiques. Le modèle construit, dans le cadre des travaux que nous présentons ici, s'inscrit dans un environnement dynamique. Les dates de vendanges sont de plus en plus précoces, même si les impacts du changement climatique varient suivant les régions et le type de vin produit. Jones et al. (2005) soulignent qu'un des moyens, pour s'adapter à ce changement, consiste à améliorer la modélisation du système viticole en incluant les potentialités du matériel végétal, le développement phénologique et l'adaptation des pratiques culturales.

Certains milieux considérés comme limitants pour la viticulture, aujourd'hui, pourraient devenir des milieux favorables à un fonctionnement de la vigne satisfaisant dans le futur. Le modèle que nous présentons ici peut servir de support aux réflexions sur les évolutions des pratiques à mettre en œuvre étant donné l'évolution du climat en testant des scénarios prospectifs. Nous pouvons envisager, à court terme, une adaptation des pratiques annuelles sur

les parcelles existantes, et, à plus long terme, une adaptation des pratiques pérennes comme le choix du porte-greffe et de la structure de plantation, voire une relocalisation des parcelles, ce qui pourrait entraîner des modifications dans l'usage des territoires (Neethling et al. 2012).

Nous avons montré qu'il était possible de construire un modèle capable de prendre en compte les interactions au sein du terroir afin d'optimiser les pratiques aux facteurs du milieu et aux objectifs de production du viticulteur. Nous avons posé des bases méthodologiques qui s'avèrent génériques. La démarche doit désormais prendre en compte d'autres zones d'étude et variables. Les extractions de connaissance issues des bases de données seront toujours couplées à de l'expertise mais nous proposons d'avoir recours à un groupe d'experts pour valider le fonctionnement du modèle générique construit.

La généricité du modèle pourrait être assurée en s'appuyant sur un dispositif intégrant un large pool de parcelles aux caractéristiques variées et connues : facteurs du milieu permanents et annuels, pratiques pérennes, semi-pérennes et annuelles des viticulteurs, niveau d'alimentation hydrique et minérale des parcelles, caractérisation sensorielle des vins. Si notre typologie est générique, l'évaluation sensorielle peut être faite sur un nombre important de vins car seuls trois critères sont à noter (l'arôme, de 'Végétal' à 'Fruité' ; la structure, de 'Léger' à 'Corsé', et les tanins de 'Fondus' à 'Secs'). La caractérisation à partir d'un jury entrainé est souhaitable, nous avons vu que les professionnels étaient consensuels pour définir des types de produits et des critères mais pas pour les évaluer sensoriellement. La caractérisation sensorielle se ferait toutefois sur des vins vinifiés expérimentalement, en conditions contrôlées, pour s'affranchir de l'effet des pratiques oenologiques. Les vins seraient produits selon un protocole de vinification obtenu par consensus d'un groupe de professionnels.

Le dispositif construit serait basé en amont sur une caractérisation fine de la variabilité des facteurs du milieu et des pratiques, comme de leurs combinaisons présentes sur les vignobles étudiés. En fonction des niveaux d'adaptation des pratiques aux divers facteurs du milieu, il s’agirait d'identifier des situations de référence.

Ces travaux contribuent à l'étude du lien au terroir, dans le cadre de la production viticole, mais peuvent aussi s'inscrivent dans des travaux plus larges visant à concevoir et évaluer des systèmes de production. La méthodologie que nous avons développée permet de modéliser la construction de la qualité des produits, elle peut s'appliquer à d'autres productions.

Conclusion

Conclusion

Cette thèse s'inscrit dans la dynamique de nouveaux travaux de recherche qui doivent contribuer au problème général de l'approche du terroir dans son sens large, à savoir en étudiant à la fois, les facteurs du milieu, les facteurs humains pris sous l'angle des pratiques culturales et œnologiques et la qualité des produits. Nous avons plus particulièrement abordé la question de la modélisation du fonctionnement de la vigne afin d'optimiser les pratiques culturales et avoir une meilleure maîtrise du type de vin obtenu. Nous avons pris en compte les facteurs du milieu, les pratiques culturales et leurs interactions possibles.

Nous avons développé une démarche de modélisation systémique basée sur la construction d'un modèle conceptuel s'appuyant sur des variables facilement accessibles et utilisant des formalismes de type 'système expert' agrégeant, par des règles de décision, des termes linguistiques. La modélisation du système par une approche de ce type semble constituer une méthode originale et un complément méthodologique aux approches fonctionnelles et aux modèles de culture complexes.

Lorsque le modèle conceptuel présenté dans cette thèse sera entièrement implémenté informatiquement, il pourra servir aux professionnels, comme support d'un outil d'aide à la décision, afin d'optimiser le choix des pratiques au regard des facteurs du milieu. Il servira également aux chercheurs, pour évaluer des scénarios prospectifs, dans le cadre d'un contexte climatique et réglementaire changeant. Le modèle peut en effet, à court terme, permettre d'adapter les pratiques annuelles, à moyen terme les pratiques pérennes ; et à plus long terme il peut aider à évaluer les impacts du changement climatique sur le fonctionnement de la vigne et les terroirs viticoles.

La modélisation du fonctionnement de la vigne à l'échelle de la parcelle s'inscrit donc dans une démarche de production durable. Elle permet d'optimiser le choix des pratiques culturales et de réduire celles qui ont une fonction correctrice; diminuant aussi, en même temps, les coûts de production tout en favorisant l'obtention de produits de qualité, valorisant au mieux les potentialités des terroirs.

Les apports de cette thèse en termes méthodologiques pourront contribuer à une meilleure qualification du produit à l'échelle du système. La méthodologie a été mise en œuvre pour la production viticole mais son application à d'autres systèmes de production peut être envisagée.

Références bibliographiques

Acevedo-Opazo C, Tisseyre B, Ojeda H, Ortega-Farias S, Guillaume S (2008) Is it possible to assess the spatial variability of vine water status ? Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin 42/4:203–219.

Agut C, Lovelle BR, Fabre F (2005) Effect of rootstock on Syrah behaviour. Dans: XIV International GESCO Viticulture Congress. Geisenheim (Germany), p. 148–154.

Allen MS, Lacey MJ (1993) Methoxypyrazine grape flavour: influence of climate, cultivar and viticulture. Wein-Wissenschaft 48(3-6):211–213.

Ameglio T, Archer P (1996) Représentativité du potentiel de base sur sols à humidité hétérogène. Agronomie 16/8:493–503.

Asselin C, Barbeau G, Morlat R (2001) Approche de la composante climatique à diverses échelles dans le zonage viticole. Bulletin de l'OIV 843-844:301–318.

Baggiolini M (1952) Les stades repères dans le développement annuel de la vigne et leur utilisation pratique. Revue romande d'Agriculture et d'Arboriculture 8/1:4–6.

Baize D (2000) Guide des analyses en pédologie. Editions Quae, Paris.

Baize D (2008) Référentiel pédologique. Editions Quae, Paris.

Ballester J, Dacremont C, Le Fur Y, Etiévant P (2005) The role of olfaction in the elaboration and use of the Chardonnay wine concept. Food Quality and Preference 16:351–359.

Barbeau G, Asselin C, Morlat R (1998) Estimate of the viticultural potential of the Loire valley « terroirs » according to a vine's cycle precocity index. Bulletin de l'OIV 71(805/806):247–262.

Barbeau G, Blin A (2011) Influence du porte-greffe sur le comportement agronomique de la vigne (var. Cabernet franc) en moyenne vallée de la Loire. Techniloire. Site : http://www.techniloire.com/documents/124963587/Essai%20porte-greffe%20CF_vf.pdf, consulté le 10/01/2012.

Barbeau G, Goulet E, Ramillon D, Rioux D, Blin A, Marsault J, Panneau JP. (2006) Effets de l'interaction Porte-Greffe / Enherbement sur la réponse agronomique de la vigne Vitis vinifera L cvs. Cabernet Franc et Chenin. Progres Agricole et Viticole 123:80–86.

Barbeau G, Morlat R, Jacquet A, Asselin C, Grassin M (1998) Déterminisme de l'effet terroir :

Influence de la surface foliaire primaire de la vigne en début de cycle sur le potentiel de vendange. Dans: Symposium International. Sienne, Italie. p 307–319.

Bayonove L, Baumes R, Crouzet J, Gunata Z (1998) Arômes. Dans: Oenologie - fondements scientifiques et technologiques. Lavoisier Tec & Doc, Paris, France, p. 163–235.

Bell SJ, Henschke PA (2005) Implications of nitrogen nutrition for grapes, fermentation and wine. Australian Journal of Grape and Wine Research 11/3:242–295.

Bérard L, Marchenay P (2006) Local products and geographical indications: taking account of local knowledge and biodiversity. International Social Science Journal 58/187:109–116.

Bockstaller C, Girardin P (2003) How to validate environmental indicators. Agricultural Systems 76/2:639–653.

Bodin F (2003) Contribution à l'étude du terroir viticole en Anjou : approche utilisant un modèle de terrain et une enquête auprès des vignerons. Thèse de doctorat, Université d'Angers.

Bodin F, Morlat R (2006) Characterization of viticultural terroirs using a simple field model based on soil depth I. Validation of the water supply regime, phenology and vine vigour, in the Anjou vineyard (France). Plant and Soil 281:37–54.

Bonfante A, Basile A, Langella G, Manna P, Terribile F (2011) A physically oriented approach to analysis and mapping of terroirs. Geoderma 167/168:103–117.

Bouchon-Meunier B, Marsala C (2003) Logique floue, principes, aide à la décision. Editions Lavoisier.

Bouleau N (1999) Philosophies des mathématiques et de la modélisation. L'Harmattan.

Bramley RGV, Hamilton RP (2007) Terroir and precision viticulture: are they compatible? Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin 41/1:1–8.

Bramley RGV, Ouzman J, Boss PK (2011) Variation in vine vigour, grape yield and vineyard soils and topography as indicators of variation in the chemical composition of grapes, wine and wine sensory attributes. Australian Journal of Grape and Wine Research 17/2:217–229.

Burgos S, Dakhel N, Docourt M, Schwarz J-J (2008) Carte des sols viticoles genevois: vers une utilisation pratique. Revue suisse de Viticulture Arboriculture et Horticulture 40/4:215–221.

Cadot Y (2010) Influence de la date de vendange sur les composés phénoliques de la baie de raisin; conséquences pour la typicité du vin. Thèse de doctorat, Centre International d'Études Supérieures en Sciences Agronomiques Montpellier Supagro.

Cadot Y (2011) Étude du lien au terroir : de la représentation conceptuelle à la représentation perceptuelle. Mise en évidence de l'importance de certains choix techniques. Chapitre 3. Représentation perceptuelle de la typicité. Site : http://techniloire.com/documents/124963587/AVBchapitre3.pdf, consulté le 10/01/2012.

Cadot Y, Caillé S, Thiollet-Scholtus M, Samson A, Barbeau G, Cheynier V (2012) Characterisation of typicality for wines related to terroir by conceptual and by perceptual representations. An application to red wines from the Loire Valley. Food Quality and Preference:24/1:48-58.

Cadot Y, Caillé S, Samson A, Thiollet-Scholtus M, Barbeau G, Casabianca F, Cheynier V (2011) Sensory typicality related to terroir: from conceptual to perceptive representation. Are winemaking practices decisive ? Dans: 9ème Symposium International d'Oenologie de Bordeaux. Bordeaux, France.

Cadot Y, Castello MTM, Chevalier A (2006) Flavan-3-ol compositional changes in grape berries (Vitis vinifera L. cv Cabernet Franc) before veraison, using two complementary analytical approaches, HPLC reversed phase and histochemistry. Analytica Chimica Acta 563:65–75.

Cain WS (1979) Know with tne nose - keys to odor identification. Science 203:467–470.

Cain WS, Drexler M (1974) Scope and evaluation of odor counteraction and masking. Annals of the New York Academy of Sciences 237:427–439.

Calonnec A, Cartolaro P, Chadoeuf J (2009) Highlighting Features of Spatiotemporal Spread of Powdery Mildew Epidemics in the Vineyard Using Statistical Modeling on Field Experimental Data. Phytopathology 99/4:411–422.

Carbonneau A (1983) Méthodes de mesures simples de la surface foliaire exposée par hectare, élément déterminant du système de conduite de la vigne. Connaissance Vigne Vin 17:257–261.

Carbonneau A (1993) Unité de terroir viticole. Le Progrès Agricole et Viticole 2:29–30.

Carbonneau A (1998) Aspects qualitatifs. Dans: Traité d'irrigation. Tec et Doc Lavoisier, p.1011.

Carbonneau A (2007) Théorie de la maturation et de la typicité du raisin. Progrès Agricole et

Viticole 124:275–284.

Carbonneau A, Deloire A, Jaillard B (2007) La vigne. Physiologie, Terroir, Culture. Editions Dunod.

Carbonneau A, Riou C, Guyon D, Riom J, Schneider C (1992) Agrométérologie de la vigne en France. INRA. Office des publications officielles des communautés européennes (1992).

Carey V, Archer E, Barbeau G, Saayman D (2007) The use of local knowledge relating to vineyard performance to identify viticultural terroirs in stellenbosch and surrounds. Dans: Nuzzo V, Giorio P, Giulivo C (éd) Proceedings of the International Workshop on Advances in Grapevine and Wine Research. Acta Horticulturae. International Society Horticultural Science, Leuven 1, p. 385–391.

Carey VA, Archer E, Barbeau G, Saayman D (2008) Viticultural terroirs in Stellenbosch, South Africa. II. The interaction of Cabernet-Sauvignon and Sauvignon blanc with environment. Journal International des Sciences de la Vigne et du vin Vin 42/4:185–201.

Carey VA, Archer E, Barbeau G, Saayman D (2009) Viticultural terrois in Stellenbosch, South Africa. III. Spatialisation of viticultural and oenological potential for Cabernet-Sauvignon and Sauvignon blanc by means of a preliminary model. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin 43/1:1-12.

Casillas J, Cordón O, Herrera F, Magdalena L (2003) Interpretability Improvements to Find the Balance Interpretability-Accuracy in Fuzzy Modeling: An Overview. Dans: Springer (éd) Interpretability Issues in Fuzzy Modeling. p. 3–22.

Celette F (2007) Dynamique des fonctionnements hydrique et azoté d'une vigne enherbée - Application à un vignoble méditerranéen. Thèse de doctorat, Montpellier Supagro.

Celette F, Findeling A, Gary C (2009) Competition for nitrogen in an unfertilized intercropping system: the case of an association of grapevine and grass cover in a Mediterranean climate. European Journal of Agronomy 30/1:41–51.

Celette F, Ripoche A, Gary C (2010) WaLIS-A simple model to simulate water partitioning in a crop association: The example of an intercropped vineyard. Agricultural Water Management 97/11:1749–1759.

Cellier P, Jacquet A, Bautrais P, Morlat R, Delanchy P (1996) Modélisation du régime thermique

des sols de vignoble du Val de Loire : Relations avec des variables utilisables pour la caractérisation des terroirs. Dans: 1er Colloque International « Les Terroirs Viticoles », Angers, 17-18 juillet 1996.

Chacon JL, Garcia E, Martinez J, Romero R, Gomez S (2009) Impact of the vine water status on the berry and seed phenolic composition of « Merlot » (Vitis vinifera L.) cultivated in a warm climate: consequence for the style of wine. Vitis 48/1:7–9.

Chambre d'Agriculture de la Gironde (2006) L'enherbement des vignobles.". Site : http://www.matevi-france.com/experimentations/06enherbement.pdf, consulté le 08/03/2011.

Chambre d'Agriculture de Rhône-Alpes L'enherbement semé (vigne). Site : http://www.rhone-alpes.chambagri.fr/phytov3/pages/enherbement.html, site consulté le 08/03/2011.

Champagnol F (1984) Éléments de physiologie de la vigne et de viticulture générale. Editions F. Champagnol Saint-Gely-du-Fesc.

Chapman DM, Matthews MA, Guinard JX (2004) Sensory attributes of cabernet sauvignon wines made from vines with different crop yields. American Journal of Enology and Viticulture 55/4:325–334.

Chapman DM, Roby G, Ebeler SE, Guinard JX, Matthews MA (2005) Sensory attributes of Cabernet Sauvignon wines made from vines with different water status. Australian Journal of Grape and Wine Research 11/3.

Chen SH, Jakeman AJ, Norton JP (2008) Artificial Intelligence techniques: An introduction to their use for modelling environmental systems. Mathematics and Computers in Simulation 78(2/3):379–400.

Choné X (2001) Contribution à l'étude des terroirs de Bordeaux : Etude des déficits hydriques modérés, de l'alimentation en azote et de leurs effets sur le potentiel aromatique des raisins de Vitis vinifera L. cv. Sauvignon blanc. Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux.

Chong I-G, Jun C-H (2005) Performance of some variable selection methods when multicollinearity is present. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems 78(1/2):103–112.

Cloquell-Ballester V-A, Cloquell-Ballester V-A, Monterde-Díaz R, Santamarina-Siurana M-C (2006) Indicators validation for the improvement of environmental and social impact

quantitative assessment. Environmental Impact Assessment Review 26/1:79–105.

Coipel J, Rodriguez Lovelle B, Sipp C, Van Leeuwen C (2006) « Terroir » effect, as a result of environmental stress, depends more on soil depth than on soil type. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin 40/4:177–185.

Comité de développement du Beaujolais Guide de l'enherbement. 24 p.

Conde C, Silva P, Fontes N, Dias ACP, Tavares RM, Sousa MJ, Agasse A, Delrot S, Gerós H (2007) Biochemical Changes throughout Grape Berry Development and Fruit and Wine Quality. Food 1/1:1–22.

Cortell JM, Halbleib M, Gallagher AV, Righetti TL, Kennedy JA (2005) Influence of vine vigor on grape (Vitis vinifera L. cv. Pinot Noir) and wine proanthocyanidins. Journal of Agricultural and Food Chemistry 53/14:5798–5808.

Cortell JM, Sivertsen HK, Kennedy JA, Heymann H (2008) Influence of vine vigor on Pinot noir fruit composition, wine chemical analysis, and wine sensory attributes. American Journal of Enology and Viticulture 59/1:1–10.

Coulon C (2006) Etude sur l'utilisation du modèle de culture dynamique stics-vigne et de l'indice de site de Tesic dans le vignoble du Val de Loire. Mémoire d'ingénieur, ENSHAP-INH.

Coulon C, Barbeau G (2007) Participation au paramétrage et utilisation du modèle de simulation du fonctionnement de la vigne STICS-Vigne. Dans: Colloque Végétal et Semences. Angers, France.

Coulon C, Ganenco A, Neethling E, Thiollet-Scholtus M (2011) Méthode de typologie d'années climatiques de référence à l'usage de la modélisation. Application à la moyenne Vallée de la Loire. Progrès Agricole et Viticole 17-2011:347–353.

Courtin V, Rioux D, Boutin D, Cesbron S, Kasprik A-C (2006) Typologie des vins en rapport avec les facteurs environnementaux du terroir et le cépage. Application au vignoble de Chinon. Dans: VIe Congrès International des Terroirs Viticoles. Bordeaux-Montpellier, France.

Cros MJ, Duru M, Garcia F, Martin-Clouaire R (2003) A biophysical dairy farm model to evaluate rotational grazing management strategies. Agronomie 23/2:105–122.

Dai ZW, Vivin P, Barrieu F, Ollat N, Delrot S (2010) Physiological and modelling approaches to understand water and carbon fluxes during grape berry growth and quality development: a review. Australian Journal of Grape and Wine Research 16:70–85.

Dalgaard T, Hutchings NJ, Porter JR (2003) Agroecology, scaling and interdisciplinarity. Agriculture, Ecosystems & Environment 100/1:39–51.

Delabays N, Spring JL, Mermillod G (2006) Essai d'enherbement de la vigne avec des espèces peu concurrentielles : aspects botaniques et malherbologiques. Revue Suisse de Viticulture, Arboriculture et Horticulture 38/6:343–354.

Delgado G, Aranda V, Calero J, Sanchez-Maranon M, Serrano JM, Sanchez D, Vila MA (2009) Using fuzzy data mining to evaluate survey data from olive grove cultivation. Computers and Electronics in Agriculture 65/1:99–113.

Deloire A (2007) Les indicateurs d'équilibre de la vigne. Fiche technique, Montpellier Supagro.

Deloire A, Lopez F, Carbonneau A (2002) Réponses de la vigne et terroir : éléments pour une méthode d'étude. Progrès Agricole et Viticole 119/4.

Deloire A, Ojeda H, Zebic O, Bernard N (2005) Influence de l'état hydrique de la vigne sur le style de vin. Progrès Agricole et Viticole 21:455–462.

Delpuech X, Celette F, Ripoche A, Barbeau G, Gary C (2009) Evaluation of a water balance model for cover cropped vineyards in Mediterranean and Altantic climate conditions. Dans: VI International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops. Vina del Mar, Chili.

Dry PR, Loveys BR (1998) Factors influencing grapevine vigour and the potential for control with partial rootzone drying. Australian Journal of Grape and Wine Research 4/3:140–148.

Dufourcq T, Bonisseau M (2004) Adaptation de la conduite du vignoble : la gestion du rapport feuilles/fruits. Rapport technique, Institut Technique de la Vigne et du Vin.

Dufourcq T, Gontier L, Serrano E, Ollat N (2005) Rapport surface folaire et poids de récolte : incidences sur l'alimentation hydrique de la vigne, la qualité du moût, la qualité du vin à partir de quatre cépages de midi-pyrénées. Dans: XIV International GESCO congress. Geisenheim, Allemagne. p 567–573.

Etchebarne F, Ojeda H, Hunter JJ (2010) Leaf:fruit ratio and vine water status effects on Grenache Noir (Vitis vinifera L.) berry composition: water, sugar, organic acids and cations. South African Journal of Enology and Viticulture 31/2:106–115.

Evsukoff AG, Galichet S, de Lima BSLP, Ebecken NFF (2009) Design of interpretable fuzzy rule-based classifiers using spectral analysis with structure and parameters

optimization. Fuzzy Sets and Systems 160/7:857–881.

Falcao LD, Burin VM, Sidinei Chaves E, Vieira HJ, Brighenti E, Rosier J-P, Bordignon-Luiz MT (2010) Vineyard altitude and mesoclimate influences on the phenology and maturation of Cabernet Sauvignon grapes from Santa Catarina State. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin 44/3:135–150.

Falcao LD, de Revel G, Perello MC, Moutsiou A, Zanus MC, Bordignon-Luiz MT (2007) A survey of seasonal temperatures and vineyard altitude influences on 2-methoxy-3-isobutylpyrazine, C-13-norisoprenoids, and the sensory profile of Brazilian Cabernet Sauvignon wines. Journal of Agriculture and Food Chemistry 55/9:3605–3612.

Fernandez Martinez R, Lostado Lorza R, Fernandez Ceniceros J, Martinez-de-Pison Ascacibar FJ (2012) Comparative analysis of learning and meta-learning algorithms for creating models for predicting the probable alcohol level during the ripening of grape berries. Computers and Electronics in Agriculture 80:54–62.

Fredes C, Moreno Y, Ortega S, Von Bennewitz E (2010) Vine balance: a study case in Carmenere grapevines. Ciencia E Investigacion Agraria 37/1:143–150.

Le Gal PY, Merot A, Moulin CH, Navarrete M, Wery J (2009) A modelling framework to support farmers in designing agricultural production systems. Environmental Modelling & Software 25/2:258–268.

Galet P (1998) Précis d'ampélographie pratique. Editions Pierre Galet.

Garcia de Cortazar Atauri I (2006) Adaptation du modèle STICS à la vigne (Vitis vinifera L.) utilisation dans le cadre d'une étude d'impact du changement climatique à l'échelle de la France. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier.

Garcia de Cortazar Atauri I, Brisson N, Gaudillere JP (2009) Performance of several models for predicting budburst date of grapevine (Vitis vinifera L.). International Journal of Biometeorology 53/4:317–326.

Garcia de Cortazar Atauri I, Brisson N, Seguin B, Gaudillere JP, Baculat B (2005) Simulation of budbreak date for vine. The BRIN model. Some applications in climate change study. Dans: XIV International GESCO Viticulture Congress, Geisenheim, Germany. p 485–490.

Gary C, Payan J-C, Kansou K, Pellegrino A, Wery J (2005) Un outil de diagnostic du vécu hydrique de parcelles viticoles, en relation avec des objectifs de rendement et de

qualité. Dans: XIV International GESCO Viticulture Congress. Geisenheim, Allemagne.

Gaudin R, Celette F, Gary C Contribution of runoff to incomplete off season soil water refilling in a Mediterranean vineyard. Agricultural Water Management 97:1534–1540.

GIEC (2007) Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Genève (Suisse).

Girardin P, Bockstaller C, Werf H van der (1999) Indicators: tools to evaluate the environmental impacts of farming systems. Journal of Sustainable Agriculture 13/4:5–21.

Girona J, Marsal J, Mata M, Del Campo J, Basile B (2009) Phenological sensitivity of berry growth and composition of Tempranillo grapevines (Vitis vinifera L.) to water stress. Australian Journal of Grape and Wine Research 15/3:268–277.

Glorennec P-Y (1999) Algorithmes d'apprentissage pour systèmes d'inférence floue. Editions Hermes Sciences Publications.

Goulet E, Barbeau G (2006) Apports des mesures de résistivité électrique du sol dans les études sur le fonctionnement hydrique du système sol/vigne. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin 40/2:2:57–69.

Goulet E, Morlat R (2010) The use of surveys among wine growers in vineyards of the middle-Loire Valley (France), in relation to terroir studies. Land Use Policy 28:770–782.

Goulet E, Morlat R, Rioux D, Cesbron S (2004) A calculation method of available soil water content: application to viticultural terroirs mapping of the Loire valley. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin 38/4:231–235.

Goutouly J-P, Drissi R, Forget D, Gaudillère J-P (2006) Caractérisation de la vigueur de la vigne par l'indice NDVI mesuré au sol. Dans: Congrès International des Terroirs Viticoles. Bordeaux-Montpellier, France. p 237–242.

Gras R, Benoit M, Deffontaines J-PD, Lafarge M, Langlet A, Osty P-L (1989) Le Fait Technique en Agronomie. Editions L'Harmattan.

Gray JD, Gibson R, Coombe BG, Iland PG, Pattison SJ (1997) Assessment of winegrape value in the vineyard—Survey of cv. Shiraz from South Australian vineyards in 1992. Australian Journal of Grape and Wine Research 3/3:1–8.

Grelier M, Guillaume S, Tisseyre B, Scholasch T (2007) Precision viticulture data analysis using

fuzzy inference systems. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin 41/1:19–31.

Guillaume S, Charnomordic B (2004) Generating an interpretable family of fuzzy partitions from data. IEEE Trans Fuzzy Syst 12/3:324–335.

Guillaume S, Charnomordic B (2010) Interpretable fuzzy inference systems for cooperation of expert knowledge and data in agricultural applications using Fispro. Dans: IEEE International Conference on Fuzzy Systems published in Knowledge Creation Diffusion Utilization. Barcelone, Spain.

Guillaume S, Charnomordic B (2011) Learning interpretable fuzzy inference systems with FisPro. Information Sciences 181/20:4409–4427.

Guillaume S, Magdalena L (2006) Expert guided integration of induced knowledge into a fuzzy knowledge base. Soft Computing 10/9:773–784.

Gutierrez AP, Williams DW, Kido H (1985) A model of grape growth and development: the mathematical structure and biological considerations. Crop science 25/5:721–728.

Guyot G (1999) Climatologie de l'environnement. Editions Dunod.

Hammel II RJ, Sudkamp T (1998) Learning fuzzy rules from data. Dans: RTO SCI Symposium on « The Application of Information Technologies (Computer Science) to Mission Systems ». Monterey, USA,.

Hardie WJ, Considine JA (1976) Response of grapes to water-deficit stress in particular stages of development. American Journal of Enology and Viticulture 27/2:55–61.

Havinal MN, Tambe TB, Patil SP (2008) Comparative studies on vine vigour and fruitfulness of grape wine varieties. Asian Journal of Horticulture 3/1:180–182.

Homayouni S, Germain C, Lavialle O, Grenier G, Goutouly JP, Van Leeuwen C, Da Costa JP (2008) Abundance weighting for improved vegetation mapping in row crops: application to vineyard vigour monitoring. Canadian Journal of Remote Sensing 34:S228–S239.

Institut Français de la Vigne et du Vin, INRA, Montpellier SupaAgro, Viniflhor (2007) Catalogue des variétés et clones de vigne cultivés en France. 2ème édition.

Institut Rhodanien (2004) Sélection Fruité/Corsée : la marche à suivre. Dans: Guide de la Vinification n°8.

Institut Technique de la Vigne et du Vin (2002) L'enherbement permanent de la vigne. Cahier Itinéraires.

Jackson J (1998) Introduction To Expert Systems. Editions Addison Wesley.

Jackson DI, Lombard PB (1993) Environmental and Management Practices Affecting Grape Composition and Wine Quality - A Review. American Journal of Enology and Viticulture 44/4:409–430.

Jacquet A, Morlat R (1997) Characterization of the climatic variability in the Loire Valley vineyard. Influence of landscape and physical characteristics of the environment. Agronomie 17(9/10):465–480.

Jamagne M (1967) Bases et techniques d'une cartographie des sols. Annales d'Agronomie 18 (Hors-série).

Jeuffroy M-H, Bergez J-E, David C, Flénet F, Gate P, Loyce C, Maupas F, Meynard J-M, Reau R, Surleau-Chambenoit C (2008) Utilisation des modèles pour l'aide à la conception et à l'évaluation d'innovations techniques en production végétale : bilan et perspectives. Dans: Système de culture innovants et durables. Educagri Editions.

Johnson LF (2003) Temporal stability of an NDVI-LAI relationship in a Napa Valley vineyard. Australian Journal of Grape and Wine Researcg 9/2:96–101.

Jones GV, White MA, Cooper OR, Storchmann K (2005) Climate change and global wine quality. Climatic Change 73/3:319–343.

Kazmierski M, Glemas P, Rousseau J, Tisseyre B (2011) Temporal stability of within-field patterns of NDVI in non irrigated mediterranean vineyards. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin 45/2:61–73.

Keller M, Hrazdina G (1998) Interaction of nitrogen availability during bloom and light intensity during veraison. II. Effects on anthocyanin and phenolic development during grape ripening. American Journal of Enology and Viticulture 49/3:341–349.

Kliewer WM, Dokoozlian NK (2005) Leaf area/crop weight ratios of grapevines: influence on fruit composition and wine quality. American Journal of Enology and Viticulture 56/2:170–181.

Koblet W, Candolfi-Vasconcelos MC, Zweifel W, Howell GS (1994) Influence of leaf removal, rootstock, and training system on yield and fruit composition of Pinot Noir grapevines. American Journal of Enology and Viticulture 45/2:181–187.

Koundouras S, Leeuwen C van, Seguin G, Glories Y (1999) Influence of water availability on vine vegetative growth, berry ripening and wine characteristics in the Mediterranean zone. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin 33/4:149–160.

Koundouras S, Tsialtas IT, Zioziou E, Nikolaou N (2008) Rootstock effects on the adaptive strategies of grapevine (Vitis vinifera L. cv. Cabernet-Sauvignon) under contrasting water status: leaf physiological and structural responses. Agriculture, Ecosystems & Environment 128(1/2):86–96.

Lamanda N, Roux S, Delmotte S, Merot A, Rapidel B, Adam M, Wery J (2011) A protocol for the conceptualisation of an agro-ecosystem to guide data acquisition and analysis and expert knowledge integration. European Journal of Agronomy 38:104–116.

Lawless HT (1999) Descriptive analysis of complex odors: reality, model or illusion? Food Quality and Preference 10(4-5):325–332.

Lawless HT, Heymann H (1998) Sensory Evaluation of Food, Principles and Practices. Editions Chapman & Hall.

Lebon E (1993) De l'influence des facteurs pédo et mésoclimatiques sur le comportement de la vigne et les caractéristiques du raisin. Thèse de doctorat, Université de Dijon.

Lebon E, Dumas V, Pieri P, Schultz HR (2003) Modelling the seasonal dynamics of the soil water balance of vineyards. Functional Plant Biology 30/6:699–710.

Lebon E, Pellegrino A, Tardieu F, Lecoeur J (2004) Shoot Development in Grapevine (Vitis vinifera) is Affected by the Modular Branching Pattern of the Stem and Intra- and Inter-shoot Trophic Competition. Annals of Botany 93:236–274.

Lee J, Steenwerth KL (2011) Rootstock and vineyard floor management influence on Cabernet Sauvignon grape yeast assimilable nitrogen (YAN). Food Chemistry 127.3:926–933.

van Leeuwen C, Friant P, Chone X, Tregoat O, Koundouras S, Dubourdieu D (2004) Influence of climate, soil, and cultivar on terroir. American Journal of Enology and Viticulture 55/3:207–217.

van Leeuwen C, Garnier C, Agut C, Baculat B, Barbeau G, Besnard E, Bois B, Boursiquot JM, Chuine I, Dessup T, Dufourcq T, García de Cortázar Atauri I, Marguerit E, Monamy C, Koundouras S, Payan J-C, Parker A, Renouf V, Rodriguez-Lovelle B, Roby J-P, Tonietto J, Trambouze W (2008) Heat requirements for grapevine varieties is essential information to adapt plant material in a changing climate. Dans: VIIth International

terroir Congress. Changins, Suisse.

van Leeuwen C, Gaudillère J-P, Tregoat O (2001) L'évaluation du régime hydrique de la vigne à partir du rapport isotopique 13C/12C. L'intérêt de sa mesure sur les sucres du moût à maturité. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin 35/4:195–205.

van Leeuwen C, Tregoat O, Chone X, Bois B, Pernet D, Gaudillere JP (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 purpose ? Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin 43/3:121–134.

van Leeuwen C van, Tregoat O, Chone X, Gaudillère J-P, Pernet D (2007) Different environmental conditions, different results: the effect of controlled environmental stress on grape quality potential and the way to monitor it. Dans: 13th Australian wine industry technical conference. Adelaide, Australia.

van Leeuwen C, Trégoat O, Choné X, Jaeck M-E, Rabusseau S, Gaudillère J-P (2003) Le suivi du régime hydrique de la vigne et son incidence sur la maturation du raisin. Bulletin de l'OIV 867-868:367–379.

Lesschaeve I (2003) Evaluating wine ''typicité" using descriptive analysis. Dans: the 5th Pangborn sensory science symposium. Boston, USA.

Lopes CM, Santos TP, Monteiro A, Rodrigues ML, Costa JM, Chaves MM (2011) Combining cover cropping with deficit irrigation in a Mediterranean low vigor vineyard. Sci Hortic 129/4:603–612.

Louarn G, Dauzat J, Lecoeur J, Lebon E (2008) Influence of trellis system and shoot positioning on light interception and distribution in two grapevine cultivars with different architectures: an original approach based on 3D canopy modelling. Australian Journal of Grape and Wine Research 14/3:143–152.

Loyce C, Rellier JP, Meynard JM (2002) Management planning for winter wheat with multiple objectives (1): The BETHA system. Agricultural Systems 72/1:9–31.

MacQueen J (1967) Some methods for classification and analysis of multivariate observations. Dans: Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. Berkeley, USA. p 281–297.

Marguerit E, Brendel O, Van Leeuwen C, Delrot S, Ollat N (2011) Grapevine rootstock genetically determine scion transpiration and its response to water deficit: an integrated

approach using ecophysiology and quantitative genetics. Dans: Systems approaches to crop improvement. Harpenden, United Kingdom.

Martens H, Naes T (1989) Multivariate calibration. Journal of Chemometrics 4/6:441.

Martin SR, Dunn GM (2000) Effect of pruning time and hydrogen cyanamide on budburst and subsequent phenology of Vitis vinifera L. variety Cabernet Sauvignon in central Victoria. Australian Journal of Grape and Wine Research 6/1:31–39.

Martinez de Toda F, Tardaguila J, Sancha JC (2007) Estimation of grape quality in vineyards using a new viticultural index. Vitis 46/4:168–173.

Matthews MA, Anderson MM (1988) Fruit ripening in Vitis vinifera L.: responses to seasonal water deficits. American Journal of Enology and Viticulture 39/4:313–320.

Matthews MA, Ishii R, Anderson MM, O'Mahony M (1990) Dependence of wine sensory attributes on vine water status. Journal of the Science of Food and Agriculture 51/3:321–335.

Maury C, Siret R, Letaief H, Symoneaux R, Jourjon F (2008) A new indicator to define grape maturity: textural maturity. Revue Suisse de Viticulture, Arboriculture et Horticulture 40/6:359–364.

Mevik B-H, Cederkvist HR (2004) Mean squared error of prediction (MSEP) estimates for principal component regression (PCR) and partial least squares regression (PLSR). Journal of Chemometrics 18/0:422–429.

Mevik B-H, Wehrens R (2007) The pls Package: Principal Component and Partial Least Squares Regression in R. Journal of Statistical Software 18/2:1–24.

Meynard JM (1998) La modélisation du fonctionnement de l'agrosystème, base de la mise au point d'itinéraires techniques et de systèmes de culture. Dans: La Conduite du Champ Cultivé : Points de Vue d'Agronomes. Editions ORSTOM. p 29–54.

Meynard JM (2008) Produire autrement : réinventer les systèmes de culture. Dans: Systèmes de culture innovants et durables. Educagri Editions. p 11–27.

Minet F, Asselin C, Duc D, Barbeau G, M. C, M.H. B (2000) Etude de l'adaptation de dix porte-greffe sur cépage Chenin, en Val de Loire, pour la production de vin de l'AOC « Coteaux du Layon ». Progrès Agricole et Viticole 117:410–422.

Mitchell G, May A, Mc Donald A (1995) PICABUE: a methodological framework for the

development of indicators of sustainable development. International Journal of Sustainable Development and World Ecology 2:104–123.

Morlat R (1981) Effects of different cultivation practices on root-system of vine and properties of soil. Agronomie 1/10:887–896.

Morlat R (1993) The soil effects on the grapevine root system in several vineyards of the Loire Valley (France). Vitis 32:35–42.

Morlat R (2010) Traité de viticulture de terroir. Editions Tec&Doc.

Morlat R, Bodin F (2006) Characterization of viticultural terroirs using a simple field model based on soil depth - II. Validation of the grape yield and berry quality in the Anjou vineyard (France). Plant and Soil 281(1/2):55/69.

Morlat R, Guibault P, Rioux D, Asselin C, Barbeau G (2001) Terroirs Viticoles : étude et valorisation. Editions Oenoplurimedia, Avenir Oenologie.

Morlat R, Hardy P (1986) Résultats concernant les variations de précocité de la vigne dans le Val de Loire - Importance du pédoclimat thermique. Dans: 3ème Symposium International sur la Physiologie de la Vigne. Bordeaux, France. p 332–338.

Morlat R, Jacquet A (2003) Grapevine Root System and Soil Characteristics in a Vineyard Maintained Long-term with or without Interrow Sward. American Journal of Enology and Viticulture 54/1:1–7.

Morlat R, Lebon E (1992) Experience of multisite trials for the study of vineyards. Progrès Agricole et Viticole 109:55–58.

Morlat R, Penavayre M, Jacquet A, Asselin C, Lemaitre C (1992) Influence des terroirs sur le fonctionnement hydrique et la photosynthèse de la vigne en millésime exceptionnellement sec (1990). Conséquence sur la maturation du raisin. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin 26/4:197–220.

Morlat R, Remoue M, Pinet P (1984) The influence of the planting density and the method of soil management on root growth in a vineyard planted on good soil. Agronomie 4/5:485–491.

Munsell-Color-Company (2000) Munsell soil Color Charts. New-York (USA).

Murisier F, Zufferey V (1997) Rapport feuilles-fruits de la vigne et qualité du raisin. Revue suisse fr Viticulture, Arboriculture et Horticulture 18/3:149–156.

Murisier F, Zufferey V (2006) The influence of plant density and hedgerow height on grape and wine quality. Trial on Chasselas vines in Leytron (Wallis, CH). Revue Suisse de Viticulture, Arboriculture et Horticulture 38/5:271–276.

Neethling E, Coulon C, Barbeau G, Courtin V, Bonnefoy C, Quénol H (2012) Viticultural strategies to adapt to climate change: Temporal and spatial changes in land use and crop practices. Dans: Xth European IFSA Symposium. Aarhus, Danemark.

Nendel C (2009) Grapevine bud break prediction for cool winter climates. International Journal of Biometeorology 54/3:231–241.

Nendel C, Kersebaum KC (2004) A simple model approach to simulate nitrogen dynamics in vineyard soils. Ecological Modelling 177(1/2):1–15.

Nguyen HTW (1996) A first course in fuzzy logic. Editions CRC-Press.

Nicod H (1998) Organisation pratique de la mesure sensorielle. Dans: Evaluation sensorielle; manuel méthodologique. Lavoisier, Paris, p. 58–63.

Odhiambo HO, Ong CK, Deans JD, Wilson J, Khan AAH, Sprent JI (2001) Roots, soil water and crop yield: tree crop interactions in a semi-arid agroforestry system in Kenya. Plant and Soil 235/2:221–233.

OIV (2004) Développement de la vitiviniculture durable. Résolution CST 01/2004.

OIV (2010) Définition du « terroir » vitinicole. Résolution VITI 333/2010.

Ojeda H (1999) Influence de la contrainte hydrique sur la croissance du péricarpe et sur l'évolution des phénols des baies de raisin (Vitis vinifera L.) cv. Syrah. Thèse de doctorat, Agro Montpellier.

Ojeda H, Andary C, Kraeva E, Carbonneau A, Deloire A (2002) Influence of pre- and postveraison water deficit on synthesis and concentration of skin phenolic compounds during berry growth of Vitis vinifera cv. Shiraz. American Journal of Enology and Viticulture 53/4:261–267.

Ollat N, Tandonnet JP, Bordenave L, Decroocq S, Geny L, Gaudillere JP, Fouquet R, Barrieu F, Hamdi S (2003) Vigour conferred by rootstock: hypotheses and direction for research. Bulletin de l'OIV 76(869/870):581–595.

Olle D, Guiraud JL, Souquet JM, Terrier N, Ageorges A, Cheynier V, Verries C (2011) Effect of pre- and post-veraison water deficit on proanthocyanidin and anthocyanin accumulation

during Shiraz berry development. Australian Journal of Grape and Wine Research 17/1:90–100.

Orlandini S, Dalla Marta A, MMatti GB (2006) Modelling grapevine responses to different training systems. Acta Horticulturae 707:49–56.

Pallas B, Louarn G, Christophe A, Lebon E, Lecoeur J (2008) Influence of intra-shoot trophic competition on shoot development in two grapevine cultivars (Vitis vinifera). Physiologia Plantarum 134.1:49–63.

Paoli J-N, Tisseyre B, Zebic O, Guillaume S (2005) Détermination et cartographie des potentialités viticoles : une approche experte. Progrès Agricole et Viticole 23:508–511.

Parker AK, De CortÁZar-Atauri IG, Van Leeuwen C, 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 17/2:206–216.

Payan JC, Salancon E (2002) Utilisation d'un modèle de bilan hydrique comme outil d'aide à la gestion de la contrainte hydrique au vignoble. Dans: 6ème rencontres rhodaniennes. Orange, France. p 21–28.

Pellegrino A, Goze E, Lebon E, Wery J (2006) A model-based diagnosis tool to evaluate the water stress experienced by grapevine in field sites. European Journal of Agronomy 25/1:49–59.

Percival DC, Fisher KH, Sullivan JA (1994) Use of fruit zone leaf removal with Vitis vinifera L. cv. Riesling grapevines. I. Effects on canopy structure, microclimate, bud survival, shoot density, and vine vigor. American Journal of Enology and Viticulture 45/2:123–132.

Perrot N, Loannou I, Allais I, Curt C, Hossenlopp J, Trystram G (2006) Fuzzy concepts applied to food product quality control: A review. Fuzzy sets and systems 157/9:1145–1154.

Piedallu C, Gegout JC, Bruand A, Seynave I (2011) Mapping soil water holding capacity over large areas to predict potential production of forest stands. Geoderma 160:355–366.

Pineau N (2006) La performance en analyse sensorielle. Une approche base de données. Thèse de doctorat, Université de Bourgogne.

Poni S, Casalini L, Bernizzoni F, Civardi S, Intrieri C (2006) Effects of early defoliation on shoot photosynthesis, yield components, and grape composition. American Journal of Enology and Viticulture 57/4:397–407.

Pouget R (1963) Recherches physiologiques sur le repos végétatif de la vigne (Vitis vinifera) : la dormance des bourgeons et le mécanisme de sa disparition. Annales de l'Amelioration des Plantes : 13.

Preston LD, Block DE, Heymann H, Soleas G, Noble AC, Ebeler SE (2008) Defining vegetal aromas in Cabernet Sauvignon using sensory and chemical evaluations. American Journal of Enology and Viticulture 59/2:137–145.

Reynolds AG, Heuvel JEV (2009) Influence of Grapevine Training Systems on Vine Growth and Fruit Composition: A Review. American Journal of Enology and Viticulture 60/3:251–268.

Ribéreau-Gayon P, Dubourdieu D, Donèche B, Lonvaud A (2004a) Traité d'oenologie. 1. Microbiologie du vin, Vinifications. Editions Dunod.

Ribéreau-Gayon P, Glories Y, Maujean A, Dubourdieu D (2004b) Traité d'oenologie. 1. Chimie du vin, Stabilisations et traitements. Editions Dunod.

Riou C (1994) The effect of climate on grape ripening: Application to the zoning of sugar content in the European community. Dans: Publications Officielles des Communautés Européennes. Luxembourg.

Riou C, Lebon E (2000) Application d'un modèle de bilan hydrique et de la mesure de la température de couvert au diagnostic du stress hydrique de la vigne à la parcelle. Bulletin de l'OIV 73(837/838):755–764.

Roby G, Harbertson JF, Adams DA, Matthews MA (2004) Berry size and vine water deficits as factors in winegrape composition: Anthocyanins and tannins. Australian Journal of Grape and Wine Research 10/2:100–107.

Sadras VO, Petrie PR (2011) Climate shifts in south-eastern Australia: early maturity of Chardonnay, Shiraz and Cabernet Sauvignon is associated with early onset rather than faster ripening. Australian Journal of Grape and Wine Research 17/2:199–205.

Sadras VO, Petrie PR (2012) Predicting the time course of grape ripening. Australian Journal of Grape and Wine Research 18/1:48–56.

Saporta G (2006) Probabilités, analyse des données et statistique. Editions TECHNIP.

Scholander PF, Hammel HT, Bradstreet ED, Hemmingsen EA (1965) Sap pressure in vascular plants. Science 148:339–346.

Sebillotte M (1974) Agronomie et agriculture. Essai d'analyse des taches de l'agronome. Cahier ORSTOM, série Biologie 24:3–25.

Sinclair TR, Seligman NG (1996) Crop modeling: From infancy to maturity. Agronomy Journal 88/5:698–704.

Smart R, Robinson M (1991) Sunlight into Wine. A Handbook for Wine Grape Canopy Arrangement. Editions Winetitles.

Smart DR, Schwass E, Lakso A, Morano L (2006) Grapevine rooting patterns: A comprehensive analysis and a review. American Journal of Enology and Viticulture 57/1:89–104.

Solis FJ, Wets RJB (1981) Minimization by random search techniques. Mathematics Operation Research 6/1:19–30.

Stone H, Sidel J (1998) Quantitative descriptive analysis: developments, applications, and the future. Food Technology Journal 52:48–52.

Stone H, Sidel J, Oliver S, Woosley A, Singleton RC (1974) La performance en analyse sensorielle. Une approche base de données. La performance en analyse sensorielle Une approche base de données 28/11:24–34.

Sturges HA (1926) The choice of a class interval. Journal of the American Statistical Association 21:65–66.

Takagi T, Sugeno M (1985) Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control. IEEE Transactions on Systems, Management and Cybernetics 15/1:116–132.

Tandonnet JP, Decroocq S, Gaudillere JP, Fouquet R, Ollat N (2005) Conferred vigour by rootstocks in grapevine: evaluation of some hypothesis. Dans: XIV International GESCO Viticulture Congress, Geisenheim, Germany. p 120–126.

Tandonnet JP, Soyer JP, Gaudillere JP, Decroocq S, Bordenave L, Ollat N (2008) Long term effects of nitrogen and water supply on confered vigour and yield by SO4 and Riparia Gloire de Montpellier rootstocks. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin 42/2:89–98.

Taskin K (2009) Increasing the accuracy of neural network classification using refined training data. Environmental Modelling & Software 24/7:850–858.

TECHN'ITAB (2003) L'enherbement de la vigne. Institut Technique de l'Agriculture Biologique.

Tenenhaus M (1998) La régression PLS: Théorie et pratique. Editions TECHNIP.

Tesic D, Keller M, Hutton RJ (2007) Influence of Vineyard Floor Management Practices on Grapevine Vegetative Growth, Yield, and Fruit Composition. American Journal of Enology and Viticulture 58/1:1–11.

Tesic D, Woolley DJ, Hewett EW, Martin DJ (2002) Environmental effects on cv Cabernet Sauvignon (Vitis vinifera L.) grown in Hawke's Bay, New Zealand. 1. Phenology and characterisation of viticultural environments. Australian Journal of Grape and Wine Research 8/1:15–26.

Thiollet-Scholtus M (2004) Construction d'un indicateur de qualité des eaux de surface vis-à-vis des produits phytosanitaires à l'échelle du bassin versant viticole. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine.

Thiollet-Scholtus M, Symoneaux R, Thibault C, Morlat R (2009) Relation entre les caractéristiques sensorielles et les conditions de production de vins rouges haut de gamme du Val de Loire. Revue Française d'Oenologie 233:6–10.

Tregoat O, Ollat N, Grenier G, Leeuwen CV (2001) Comparative study of the accuracy and speed of various methods for estimating vine leaf area. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin 35/1:31–39.

Trnka M, Brázdil R, Dubrovský M, Semerádová D, Štěpánek P, Dobrovolný P, Možný M, Eitzinger J, Málek J, Formayer H, Balek J, Žalud Z (2011) A 200-year climate record in Central Europe: implications for agriculture. Agronomy for Sustainable Development:1–11.

Trought MCT, Dixon R, Mills T, Greven M, Agnew R, Mauk JL, Praat JP (2008) The impact of differences in soil texture within a vineyard on vine vigour, vine earliness and juice composition. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin 42/2:67–72.

de Turckheim E, Hubert B, Messéan A (2009) Concevoir et construire la décision. Editions Quae.

Ubigli M, Bosso A, Cargnello G (1996) Correlations between some wine sensory descriptors and grape harvest time. Acta Horticulturae 427:405–410.

Valdes H, Celette F, Fermaud M, Cartolaro P, Clerjeau M, Gary C (2005) How to evaluate the influence of vegetative vigour in vine sensitivity to cryptogamic diseases? Dans: XIV International GESCO Viticulture Congress, Geisenheim, Germany. p 832–838.

Vaudour E (2003) Les terroirs viticoles. Définitions, caractérisation et protection. Editions Dunod.

Vaudour E, Morlat R, Van Leeuwen C, Doledec A-F (2005) Terroirs viticoles et sols. Editions Dunod.

Vivin P, Castelan M, Gaudillère J-P (2002) A source/sink model to simulate seasonal allocation of carbon in grapevine. Acta Horticulturae 584:43–56.

Walker RR, Zhang X, Godwin DC, White R, Clingeleffer PR (2005) Vinelogic growth and development simulation model - rootstock and salinity effects on vine performance. Dans: XIV International GESCO Viticulture Congress, Geisenheim, Germany. p 443–448.

Weber R (1992) Fuzzy-ID3: a class of methods for automatic knowledge acquisition. Dans: 2nd International Conference on Fuzzy Logic and Neural Networks. Iizuka, Japan. p 265–268.

Zadeh LA (1965) Fuzzy Sets. Information and Control 8:338–353.

Zhu Y, Cao WX, Dai TB, Tian YC, Yao X (2007) A knowledge model system for wheat production management. Pedosphere 17/2:172–181.

Zufferey V, Murisier F (2006) Terroirs viticoles vaudois et alimentation hydrique de la vigne. Revue Suisse de Viticulture, Arboriculture et Horticulture 38/5:283–287.

Méthode de typologie d'années climatiques de référence à l'usage de la modélisation. Application à la moyenne vallée de la Loire.

Method of typology of reference climatic years intended for modelling. Application to the middle Loire valley.

Cécile Coulon*, Alexandru Ganenco, Etienne Neethling, Marie Thiollet-Scholtus
INRA-UE1117 Vigne et Vin, UMT Vinitera, 42 rue Georges Morel, Fr-49071 Beaucouzé
*cecile.coulon@angers.inra.fr

Résumé : Le climat a un effet majeur sur le développement de la vigne et par conséquent sur la composition du raisin. Dans le cadre de travaux de recherche en modélisation, les chercheurs doivent s'assurer de la représentativité et de la variabilité climatique des années prises en compte. Il est ainsi nécessaire de caractériser en amont le climat des différentes années. Nous avons procédé à une classification des 16 dernières années climatiques de la moyenne vallée de la Loire, de 1995 à 2010. Quatre types ont été caractérisés en fonction de leurs régimes thermique et hydrique ; 1995, 2004, 2005, 2006 et 2010 : plus chauds et plus secs ; 1997, 2001 et 2003 : plus chauds et un régime hydrique dans la moyenne ; 1996, 2002 et 2008 : plus frais et plus secs ; 1998, 1999, 2000, 2007 et 2009 : un régime thermique dans la moyenne et plus humides. Nous proposons une méthode qui prend en compte la précocité de développement de la vigne dans le calcul de variables climatiques.

Mots-clés : climat, modèle, typologie, vigne

Abstract: Climate has a major impact on vine development and consequently on berry composition. As part of research studies on modelling, researchers have to make sure about the representativeness and climatic variability of the years taken into account. Climate of these years has to be characterized upstream. We classified the last 16 climatic years of the middle Loire valley from 1995 to 2010. Four types were characterized according to their thermal and water supply regimes; 1995, 2004, 2005, 2006 and 2010: warmer and drier; 1997, 2001 and 2003: warmer and intermediate water supply; 1996, 2002 and 2008: cooler and drier; 1998, 1999, 2000, 2007 and 2009: intermediate heat and water supply. We propose a method that takes precocity of vine development into account in the calculation of climatic variables.

Key words: climate, model, typology, vine

INTRODUCTION

De nombreux facteurs influencent les caractéristiques du raisin vendangé par un viticulteur. Certains sont permanents comme les caractéristiques du sol, du sous-sol, l'environnement paysager et les pratiques agro-viticoles liées à l'implantation de la parcelle. D'autres facteurs sont variables comme les pratiques agro-viticoles mises en œuvre au cours du cycle de la vigne. Parmi les facteurs variables, on classe aussi le climat qui de plus n'est pas maîtrisable (Jackson, 2008 ; Morlat, 2010).

Dans le cadre de travaux de recherche, notamment celui de la construction de modèles agronomiques, il peut être utile de faire référence à des années climatiques. Il faut s'assurer de la diversité des années climatiques prises en compte dans le jeu de données de construction du modèle, la diversité climatique conditionnant ses performances.

L'objectif de cet article est de proposer une méthode pour caractériser le climat de différentes années afin de choisir des années de référence dans le cadre de travaux de modélisation. Nous appliquons cette méthode aux 16 dernières années de la moyenne vallée de la Loire.

MATERIEL ET METHODES

Origine des données météorologiques.

La variabilité interannuelle du climat des 16 dernières années climatiques (de 1995 à 2010) en moyenne Vallée de la Loire a été caractérisée en utilisant les données de la station météorologique de Montreuil-Bellay (N° INSEE de la station : 49215002 ; latitude : 47°07'48" N, longitude : 00°08'24" O, altitude : 58 m ; ouverture de la station le 01/02/1995 ; producteur : INRA). Les données brutes sont issues de relevés journaliers, il s'agit des températures minimales, moyennes et maximales de l'air (en degré Celsius), de la pluviométrie (en mm) et de l'évapotranspiration potentielle selon la formule de Penman-Monteith (en mm) (Monteith, 1965).

Structure de la base de données.

Une base de données a été constituée à partir des données météorologiques journalières de température, pluviométrie et évapotranspiration afin de calculer les variables permettant de caractériser le climat.

Nous avons pris comme référence le cépage Cabernet franc, cépage majoritaire de la moyenne vallée de la Loire. Le cycle de la vigne a été découpé en quatre périodes (p1 à p4) qui correspondent à différentes phases d'activité de la plante. Les cinq dates (exprimées en jours juliens, variables t0 à t4) qui découpent le cycle de développement de la vigne en quatre périodes correspondent chacune à l'accumulation à partir du 1er janvier d'un certain nombre de degrés-jour, en base 10°C, selon (Van Leeuwen *et al.*, 2008) (Figure 1). La date de récolte (t4)

est fixée au 31 octobre si la somme des degrés-jour optimale n'est pas atteinte. Nous avons aussi pris en compte une date intermédiaire entre la date de mi-floraison et la date de mi-véraison (t2) pour affiner le découpage du cycle de la vigne et prendre en compte une date entre la nouaison et la fermeture de la grappe qui correspond au stade K selon (Baggioloni, 1952). Nous appelons les cinq stades déterminés suivant l'accumulation de degrés-jour 'stades théoriques' (Figure 1).

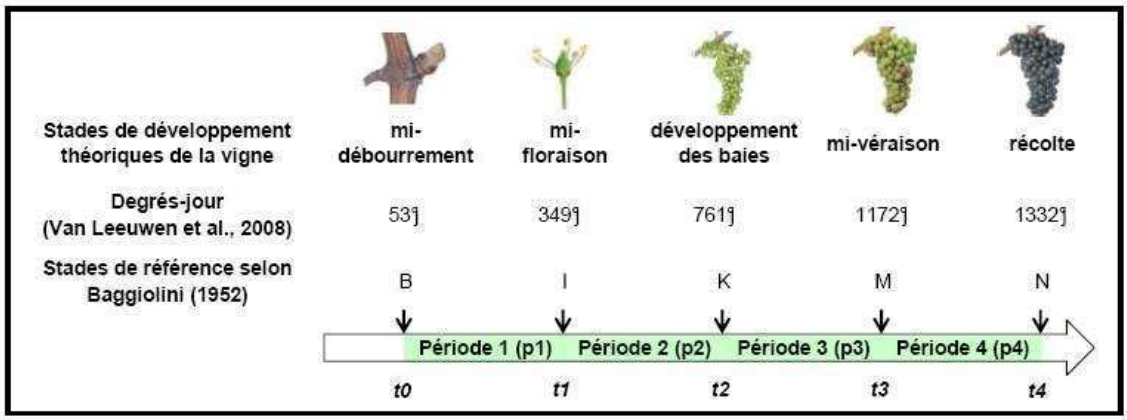


Figure 1 : Périodes prises en compte dans le cadre de l'étude

Caractéristiques des variables constituant la base de données.

Nous avons ensuite calculé :

1. Les **indices de précocité** (variables « iP ») de chaque stade théorique selon la formule suivante de (Barbeau *et al.*, 1998) :

$$iP = 100 \times (1 + \frac{Sm - Si}{Sm})$$

avec iP : indice de précocité du stade,

Sm : date moyenne du stade pour l'ensemble des années de l'étude,

Si : date du stade de l'année pour laquelle l'indice est calculé.

Lorsque l'indice de précocité est supérieur à 100, le stade de l'année est considéré comme plus précoce que la moyenne.

2. Les moyennes des **températures moyennes** (variables « Tmoy ») et les sommes de pluviométrie (variables « P ») pour les quatre périodes.

3. Les valeurs de **réserve en eau des sols** à chaque stade théorique (variables « FTSW ») calculées à partir du modèle de bilan hydrique de (Riou and Lebon, 2000) et exprimées en fraction d'eau transpirable par la vigne (FTSW exprimé en %) selon (Pellegrino *et al.*, 2006). La valeur de FTSW un jour donné du cycle correspond au rapport entre la valeur de la réserve en eau calculée ce jour-là par le modèle de bilan hydrique et la valeur de réserve en eau maximale du sol. La réserve en eau maximale du sol prise en compte est de 100 mm, valeur la plus fréquemment rencontrée en moyenne vallée de la Loire.

4. **Les indices de la classification climatique multicritères** (CCM) de Tonietto et Carbonneau (2004) :

a) **L'indice héliothermique de Huglin** (IH) (Huglin, 1978) calculé à partir des températures maximales (Tmax) et moyennes (Tmoy) supérieures à 10°C et d'un coefficient de latitude (k), fixé à 1.05 pour la zone de Montreuil-Bellay. 10°C est considéré comme la température minimale de croissance de la vigne. La somme des valeurs au dessus de 10°C est cumulée du 1er avril au 30 septembre, période moyenne correspondant au développement végétatif et reproducteur de la vigne. L'IH est bien corrélé aux teneurs en sucres des baies de raisins (Tonietto et Carbonneau, 2004). L'IH est découpé en 6 classes : très frais ≤ 1500, frais]1500-1800], tempéré]1800-2100], tempéré chaud]2100-2400], chaud]2400-3000] et très chaud > 3000.

b) L'**indice de fraîcheur des nuits** (IF) qui correspond à la moyenne des températures minimales du mois de septembre, période de maturation du raisin (Tonietto et Carbonneau, 2004). La teneur en anthocyanes des raisins et donc la couleur potentielle des vins rouges est favorisée par des nuits fraîches pendant la période de maturation (Kliewer and Torres, 1972). L'IF permet de classer les climats en fonction de la température nocturne pendant la période de maturation. Il est découpé en 5 classes : nuits chaudes >18°C, nuits tempérées]14-18] °C, nuits fraîches]12-14] °C, nuits très fraîches ≤ 12 °C.

c) L'**indice de sécheresse** (IS) qui correspond à un bilan hydrique théorique calculé du 1er avril au 30 septembre, est mesuré sur la base du modèle de bilan hydrique de (Riou and Lebon, 2000). La réserve en eau maximale du sol est fixée à 200 mm dans le cas du calcul de l'IS. Il est découpé en 5 classes : absence de sécheresse / humide > 150 mm, absence de sécheresse / sub-humide [50 ; 150[mm, sécheresse modérée [-100 ; 50[mm, sécheresse forte [-200 ; -100[mm et sécheresse très forte < - 200 mm.

La base de données ainsi constituée figure au tableau 1.

Tableau 1 : Variables de l'étude. t0 : date de débourrement théorique, t1 : date de floraison théorique, t2 : date à mi chemin entre la floraison et la véraison théoriques, t3 : date de véraison théorique, t4 : date de récolte théorique, calculées selon (Van Leeuwen *et al.,* 2008). p1 : période entre t0 et t1, p2 : période entre t1 et t2, p3 : période entre t2 et t3, p4 : période entre t3 et t4.

Codage	Variables
iP_t1	Indices de précocité de chaque stade théorique calculés selon la méthode de (Barbeau et al., 1998)
iP_t2	
iP_t3	
iP_t4	
Tmoy_p1	Moyennes des températures moyennes de chaque période (°C)
Tmoy_p2	
Tmoy_p3	
Tmoy_p4	
P_p1	Sommes des précipitations au cours de la période considérée (mm)
P_p2	
P_p3	
P_p4	
FTSW_t2	Fraction d'eau transpirable par la vigne (%), selon (Pellegrino et al., 2006) à chaque stade théorique
FTSW_t3	
FTSW_t4	
IH_CCM	Indice de Huglin (°Cj)
IF_CCM	Indice de fraîcheur des nuits (°C)
IS_CCM	Indice de sécheresse (mm)

Méthode d'analyse de la base de données pour construire la typologie climatique.

Etape 1 : Une analyse statistique descriptive a tout d'abord été réalisée pour évaluer la gamme de variation de chaque variable, les valeurs moyennes et les corrélations entre les variables.

Etape 2 : Une classification ascendante hiérarchique (CAH) a ensuite été réalisée selon la méthode de Ward par une analyse de dissimilarités en prenant en compte la distance euclidienne. Le but de ce regroupement est d'obtenir le minimum de variance au sein des classes pour assurer une homogénéité des années et un maximum de variance entre les classes pour assurer que les classes soient différentes entre elles. Cette méthode permet de ne pas déterminer *a priori* le nombre de classes. Pour chaque classe, l'année dont les coordonnées sont les plus proches du barycentre de la classe peut être considérée comme année de référence.

Etape 3 : Afin de caractériser les groupes de la CAH, une Analyse Factorielle Discriminante (AFD) a ensuite été réalisée. Les conditions pour réaliser une ANOVA ne pouvant pas toujours être respectées (les observations doivent suivre une loi normale, ce qui n'est par exemple pas le cas pour les valeurs de réserves en eau ou les accumulations de degrés-jours).

L'AFD permet de savoir si les groupes sont bien séparés et suivant quels critères. Seuls les critères dont les corrélations avec les facteurs étaient les plus fortes (R>0.65) ont été retenu La p-value du Lambda de Wilks si elle est inférieure à 0.05 permet de confirmer que les barycentres des groupes sont suffisamment éloignés pour que l'AFD puisse être interprétée.

Mise en relation de la classification climatique avec la concentration en sucre et en acidité totale des raisins.

Les groupes obtenus à partir de la classification ascendante hiérarchique réalisée en fonction des variables climatiques ont été mis en relation avec les concentrations en sucre et en acidité totale des raisins analysés lors des suivis de maturité. Les données de huit parcelles proches de la station météorologique (dans un rayon de 15 km) ont été prises en compte. La concentration en sucre a été mesurée par réfractométrie et la concentration en acidité totale par titrimétrie ; les deux sur jus filtré. Toutes les parcelles étaient vouées à produire un rouge de moyenne gamme. Les comparaisons entre les concentrations des différentes années ont été réalisées à une date commune. La date du 15 septembre a été retenue, cette date étant la seule à laquelle nous pouvions avoir les valeurs pour l'ensemble des années. Lorsque les prélèvements de baies n'avaient pas été réalisés le 15 septembre, les concentrations ont été obtenues par extrapolation linéaire entre les deux dates de prélèvements encadrant le 15 septembre. Les facteurs du climat n'étant pas les seuls à avoir un impact sur la composition du raisin, pour chaque année, la moyenne des huit parcelles permet de diminuer le biais dû à l'impact des facteurs du sol et des pratiques sur la composition du raisin.

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel Xlstat 2009 1.02.

RESULTATS ET DISCUSSION

Les indices de Huglin (IH) et de sécheresse (IS) de la classification climatique multicritères, couramment utilisés pour classer les climats à l'échelle mondiale, permettent également de caractériser les années à l'échelle régionale. Les années sont réparties dans trois classes de l'IH : frais, tempéré et tempéré chaud et deux classes pour l'IS : absence de sécheresse et sécheresse modérée (Figure 2). Il faut remarquer que la valeur de réserve en eau maximale prise en compte dans le calcul de l'IS est de 200 mm ; toutefois en moyenne Vallée de la Loire les sols ont majoritairement une réserve en eau de 100 mm. Cela ne modifie pas les écarts entre les années mais décale l'échelle des niveaux de sécheresse vers une sécheresse plus forte. D'après notre analyse, l'indice de fraîcheur des nuits (IF) n'est pas une variable discriminant les années. IF varie de 9 à 14°C, soit des nuits fraîches à très fraîches, donc finalement des conditions favorables à la synthèse des anthocyanes (Kliewer and Torres, 1972), même pour les années jugées plus chaudes dans le cadre de notre étude. D'après cette classification, 2003 apparaît comme l'année la plus chaude, 2008 la plus fraîche, 2005 la plus sèche et 2007 la plus humide.

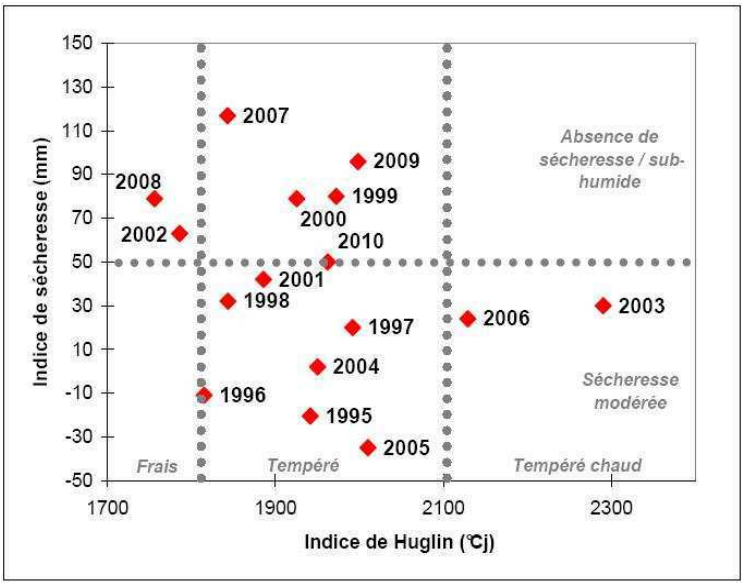


Figure 2 : Représentation des années en fonction de l'indice de Huglin (en abscisse, en degré Celsius-jours) et de l'indice de Sécheresse (en ordonnée, en mm/an).

La classification ascendante hiérarchique (CAH) a permis d'obtenir 4 grands types d'années ainsi que l'année la plus proche du barycentre de chacun des types. Groupe A : 2004, 1995, 2010, 2005* et 2006 ; Groupe B : 2003, 1997* et 2001; Groupe C : 2002, 1996 et 2008*; et Groupe D : 2007, 1999, 1998, 2000* et 2009 (* : année la plus proche du barycentre, considérée comme année de référence du type) (Figure 3).

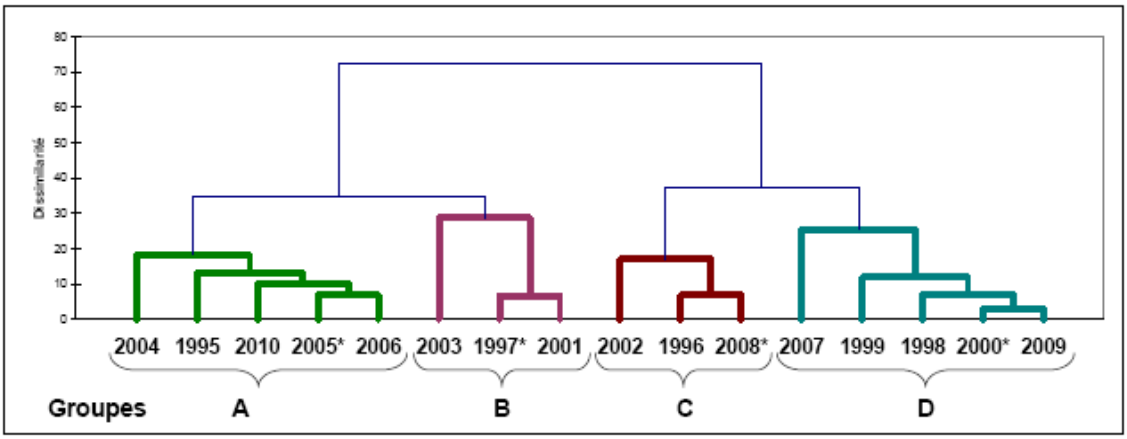


Figure 3 : Dendrogramme de la classification ascendante hiérarchique (CAH) des 16 années réalisée selon la méthode de Ward par analyse de dissimilarité. Les années sont groupées en 4 types. * années les plus proches du barycentre de chaque type.

Selon la classification climatique multicritères, le type A est qualifié de 'tempéré à tempéré chaud / sécheresse modérée', nous le nommons 'A-ChauS', le type B de 'tempéré à tempéré chaud / sécheresse modérée', avec une sécheresse moins importante que le groupe A, nous le nommons 'B-ChauM', le type C de 'frais à tempéré / absence de sécheresse à sécheresse modérée', nous le nommons 'C-FraiS' et le type D de 'tempéré / absence de sécheresse nous le nommons 'D-MHum' (Figure 4).

L'Analyse Factorielle Discriminante a permis de confirmer que les 4 types d'années climatiques sont bien distincts, la p-value du Lambda de Wilks est égal à 0,01%. Les types d'années climatiques sont essentiellement différenciés suivant le premier facteur F1 qui explique 68% de la variabilité et suivant le second facteur F2 qui explique 29% de la variabilité (Figure 4). F1 discrimine les années suivant le régime thermique et F2 suivant le régime hydrique.

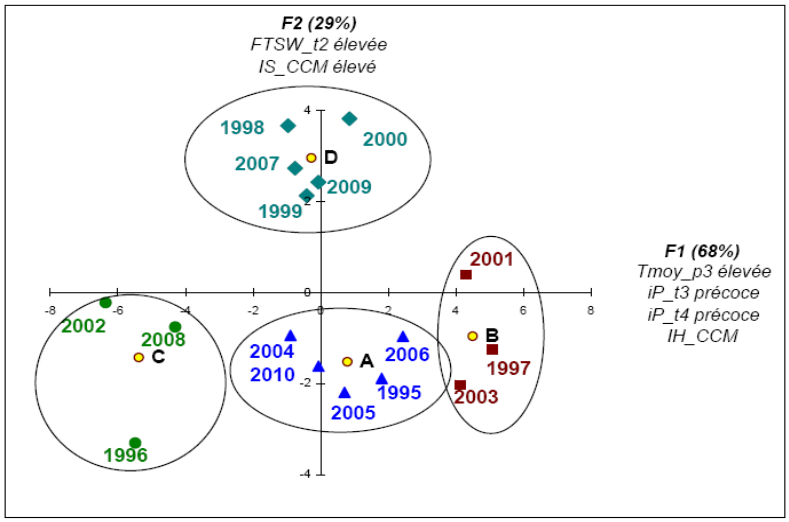


Figure 4 : Représentation des 4 types (A, B, C et D) obtenus suite à la CAH suivant les deux premiers facteurs de l'Analyse Factorielle Discriminante. Le premier facteur F1 discrimine les années suivant le régime hydrique et le second F2 suivant le régime thermique.

F1 est fortement lié à Tmoy_p3 (R=0,88), la température moyenne juste avant la mi-véraison théorique, iP_t3 (R=0,84), l'indice de précocité de la mi-véraison théorique, iP_t4 (R=0,82), l'indice de précocité de la récolte théorique et IH_CCM (R=0,69), l'indice de Huglin.

F2 est fortement lié à FTSW_t2 (R=0,77), la valeur de la fraction d'eau transpirable disponible à la date à mi-chemin entre la floraison et la véraison et IS_CCM (R=0,71), l'indice de sécheresse.

Le type C-FraisS (1996, 2002 et 2008) est ainsi caractérisé comme le plus frais, le type B-ChauM (1997, 2001 et 2003) comme le plus chaud, et le D-MHum (1998, 1999, 2000, 2007 et 2009) se distingue des autres avec un régime hydrique non limitant en eau pour la vigne. Il faut

remarquer que d'une part FTSW_t2 et IH_CCM sont significativement corrélés ainsi que Tmoy_p3, iP_t3, iP_t4 et IH_CCM entre eux (Tableau 2).

Tableau 2 : Coefficients de corrélations de Pearson entre les six variables discriminantes (les valeurs en gras indiquent les corrélations significatives avec une probabilité d'erreur inférieure à 5%).

Variables	Tmoy_p3	IH_CCM	IS_CCM	FTSW_t2	iP_t3	iP_t4
Tmoy_p3	**1**					
IH_CCM	**0,76**	**1**				
IS_CCM	-0,34	-0,23	**1**			
FTSW_t2	-0,12	0,11	**0,64**	**1**		
iP_t3	**0,88**	**0,88**	-0,11	0,03	**1**	
iP_t4	**0,85**	**0,92**	-0,11	0,08	**0,96**	**1**

Le passage d'un type à l'autre se faisant de manière progressive, les gammes d'amplitude des six variables discriminant le plus les années sont indiquées au tableau 3. Le type C-FraiS est plus frais avec une température moyenne avant véraison inférieure à 18°c. Les types A-ChauS et C-FraiS plus secs ont une contrainte hydrique parfois déjà forte entre la floraison et la véraison pour certaines années (FTSW_t2 de 15 et 14% pour 2004 et 1996). Le groupe C-Frais présente des taux de sucre inférieurs à la moyenne et une acidité totale plus forte. Les groupes les plus chauds, A-ChauS et B-ChauM, sont caractérisés par les teneurs en sucre les plus élevées (205 et 207 g/l).

Tableau 3 : Amplitude des valeurs des variables climatiques discriminantes et des teneurs en sucre et en acidité totale mesurés le 15 septembre. Nous indiquons entre parenthèses la variation vis-à-vis de la moyenne de l'ensemble des années (+ : plus élevé, - : moins élevé, +/- : autour de la moyenne)

Groupe	A-ChauS (2005)	B-ChauM (1997)	C-FraiS (2008)	D-MHum (2000)
Régime thermique	Plus chaud et précoce	Plus chaud et précoce	Plus frais et tardif	Moyen
Régime hydrique	Plus sec	Moyen	Plus sec	Plus humide
FTSW_t2 (%)	15 à 54 (+/-)	34 à 71 (+)	14 à 66 (+/-)	51 à 84 (+)
IS_CCM (mm)	-35 à 50 (-)	20 à 42 (-)	-11 à 79 (+/-)	32 à 117 (+)
Tmoy_p3 (°C)	19,7 à 22,6 (+/-)	21,3 à 23,0 (+)	17,2 à 18,0 (-)	17,8 à 20,5 (+/-)
iP_t3	100 à 106 (+)	101 à 110 (+)	91 à 95 (-)	98 à 101 (+/-)
iP_t4	99 à 108 (+)	101 à 115 (+)	88 à 91 (-)	96 à 104 (+/-)
IH_CCM (°Cj)	1941 à 2129 (+)	1886 à 2290 (+)	1756 à 1815 (-)	1843 à 1998 (+/-)
Sucre (g/l)	167 à 205 (+/-)	158 à 207 (+/-)	156 à 166 (-)	151 à 184 (+/-)
Acidité totale (g d'H2SO4/l)	5,6 à 7,6 (+/-)	4,1 à 7,4 (+/-)	7,2 à 8,9 (+)	5,8 à 7,8 (+/-)

Les indices de Huglin, de sécheresse et de fraîcheur des nuits sont calculés avec les mêmes dates de début et de fin de développement quelque soient les caractéristiques de l'année climatique. Ils permettent de caractériser, comme nous l'avons présenté précédemment, la variabilité climatique des années et permettent à la fois une caractérisation du climat en fonction de la température et en fonction de la pluviométrie. Les types climatiques identifiés peuvent servir de référence pour utiliser des modèles agronomiques. Les données retenues sont facilement accessibles et la méthode facile à mettre en œuvre. Compte tenu de la grande variabilité des dates théoriques de débourrement de la vigne selon les années : 34 jours entre 2001 et 2000/2008, soit une amplitude de 19% pour une durée totale du cycle de 182 jours (6 mois) et de date de vendange théorique : 72 jours entre 1996 et 2003, soit 40%, nous proposons d'affiner cette méthode de typologie des années en utilisant les stades phénologiques de la vigne. En effet, lorsque le climat est caractérisé dans l'objectif d'évaluer son impact sur une culture, la prise en compte des états de la culture et la caractérisation des variables climatiques à différents stades de la culture paraît être une méthode complémentaire qui permet d'affiner la qualification des types d'années climatiques.

Le calcul de variables en fonction des états de développement de la vigne permet d'affiner la classification et de prendre en compte les variations de précocité de développement qui peuvent être très fortes d'une année à l'autre. Pour l'indice de sécheresse, un second calcul complémentaire pourrait ainsi débuter le jour de la date de débourrement théorique obtenue en fonction de la somme d'accumulation de degré-jours à partir du 1er janvier, date t0. L'indice de sécheresse ainsi calculé correspondrait à la variable FTSW_t4. L'indice de fraîcheur des nuits pourrait être calculé entre la date de mi-véraison, date t3 et la date de récolte théorique, date t4. Il faut toutefois remarquer qu'un indice pourrait alors avoir la même valeur pour plusieurs années bien qu'il y ait un décalage dans le temps du développement de la culture d'où une complémentarité entre les deux modes de calcul. Une première évolution consisterait donc à modifier les dates prises en compte dans le calcul des indices climatiques. Une autre évolution concerne la valeur de la température de base prise en compte suite aux travaux récents de Parker *et al.* (2011), Garcia de Cortazar Atauri *et al.* (2009) et de Nendel (2009) sur différents cépages qui montrent que cette température serait plutôt respectivement de 0°C, 5°C et 6°C, pour l'instant les indices et les dates des stades théoriques selon (Van Leeuwen *et al.*, 2008) sont calculés avec une température de base de 10°C.

Cette méthodologie de caractérisation climatique permet de s'assurer de la représentativité des années et d'évaluer la diversité de celles prises en compte dans le cadre de travaux de recherche. Ainsi par exemple une expérimentation suivie en moyenne Vallée de la Loire pendant 3 années en 1998, 1999 et 2000 ne permettrait pas d'avoir une variabilité climatique maximale, les trois années appartenant au même groupe climatique (groupe D-MHum). Au contraire une expérimentation suivie en 2008, 2009 et 2010 garantirait cette représentativité, les trois années appartenant aux trois groupes les plus extrêmes de la

classification (groupes A-ChauS, C-ChauM et D-MHum). Pour une série temporelle de 4 années de suivis seule la série 1995, 1996, 1997 et 1998 permet d'avoir les 4 groupes représentés.

D'après Garcia de Cortazar (2006), en moyenne vallée de la Loire, 2003 est une année de référence pour l'impact du changement climatique sur la température. Cela est toutefois uniquement valable pour les mois de juin, juillet et août, les conditions des autres périodes étant différentes de celles attendues dans le futur, les scénarii d'évolution du climat indiquent notamment une diminution de la pluviométrie au printemps et en été. D'après notre analyse les années du type A-ChauS seraient donc les années les plus proches de celles que nous pourrions rencontrer dans le futur.

CONCLUSION

Nous avons caractérisé quatre types climatiques de référence à l'aide d'une méthode prenant en compte plusieurs variables climatiques et d'une base de données des 16 dernières années. Les années de référence de ces 4 types sont 1997, 2000, 2005 et 2008. Les types climatiques sont caractérisés à la fois par leur régime thermique et leur régime hydrique. L'indice de sécheresse et l'indice de Huglin de la Classification Climatique Multicritères permettent de discriminer les années climatiques, cette classification fonctionne donc aussi bien à l'échelle mondiale que régionale. Ces deux indices, couplés à des variables calculées en fonction des états de développement de la vigne et de la température, permettent de caractériser plus finement encore les types climatiques précédemment identifiés. Les groupes climatiques sont liés à des concentrations en sucre et en acidité totale différentes. Suite à cette étude, deux pistes de progrès sont proposées ici en complément des indices déjà couramment utilisés : i) un calcul des variables climatiques en fonction des stades théoriques de développement de la vigne, ces derniers étant calculés à partir de l'accumulation de degrés-jour et ii) la modification de la température de base prise en compte pour calculer cette accumulation de température et les indices climatiques. La méthodologie, employée pour cette étude, permet d'alimenter les travaux de recherche en modélisation en caractérisant le climat des années passées et aussi de connaître la variabilité climatique prise en compte dans le cadre d'études visant à observer le comportement de parcelles sur plusieurs années. Le type climatique identifié comme le plus chaud et le plus sec pourrait aider à anticiper le climat du futur.

Remerciements : Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une thèse de doctorat et d'un stage de fin d'étude de master financés par le département 'Science pour l'Action et le Développement' de l'Institut National de la Recherche Agronomique, la région 'Pays de Loire' et Interloire. Nous remercions le personnel de l'Association Technique Viticole du Maine-et-Loire pour la mise à disposition des données de maturation et Séverine Julien, Gérard Barbeau et René Morlat pour leurs commentaires.

REFERENCES

BAGGIOLINI M., 1952. Les stades repères dans le développement annuel de la vigne et leur utilisation pratique. *Revue romande d'Agriculture et d'Arboriculture* 8 (1) : 4-6.

BARBEAU G., ASSELIN C. and MORLAT R., 1998. Estimate of the viticultural potential of the Loire valley "terroirs" according to a vine's cycle precocity index. *Bulletin de l'OIV* 71(805/806): 247-262.

GARCIA DE CORTAZAR ATAURI I., 2006. Adaptation du modèle STICS à la vigne (Vitis vinifera L.), utilisation dans le cadre d'une étude d'impact du changement climatique à l'échelle de la France. *Thèse présentée pour obtenir le grade de docteur de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier* : 292p.

GARCIA DE CORTAZAR ATAURI I. , BRISSON N. and 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.

HUGLIN P., 1978. Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture* 64(13): 1117-1126.

JACKSON R. S., 2008. Wine Science. Principles and Applications. Elsevier, 751p

KLIEWER W.M. and TORRES R.E. 1972. Effect of controlled day and night temperatures on grape coloration. *American Journal of Enologie and Viticulture*, 23(2), 71-77.

MONTEITH J., 1965. Evaporation and environment. In *The state and movement of water in living organisms*, Cambridge University Press. XIXth Symposia of the Soc. for Exp. Biol. : 205–234.

MORLAT R., 2010. Traité de viticulture de terroir. Lavoisier, 492p.

NENDEL C., 2009. Grapevine bud break prediction for cool winter climates. *International Journal of Biometeorology,* 54:231–241.

OJEDA H., ANDARY C., KRAEVA E., CARBONNEAU A. and DELOIRE A., 2002. Influence of pre- and postveraison water deficit on synthesis and concentration of skin phenolic compounds during berry growth of Vitis vinifera cv. Shiraz. *American Journal of Enology and Viticulture,* 53(4): 261-267.

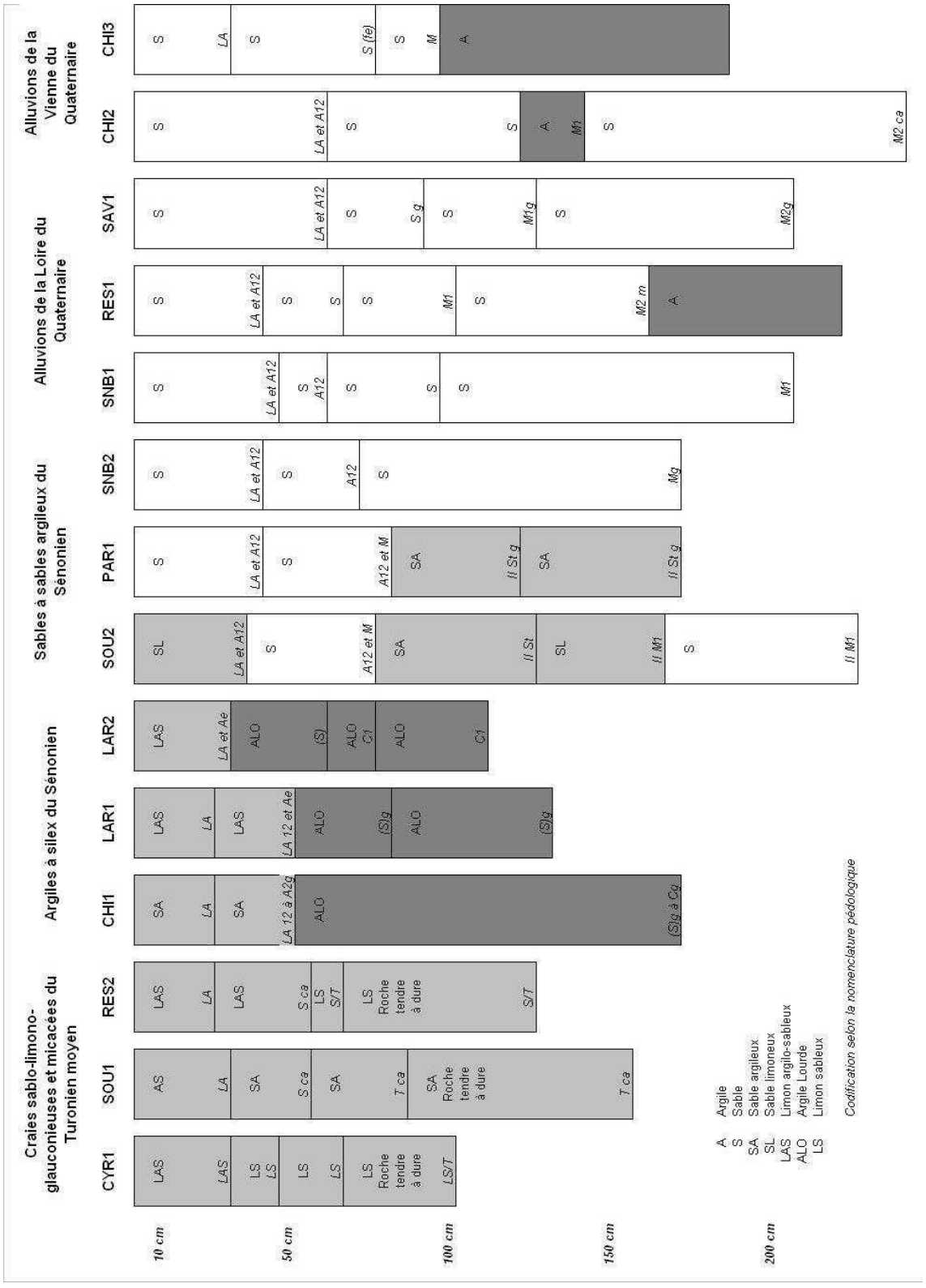
PARKER A.K., GARCIA DE CORTAZAR ATAURI I., VAN LEEUWEN C. and CHUINE I., 2011. General phenological model to characterise the timing of flowering and veraison of *Vitis vinifera* L. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 17:206-216.

PELLEGRINO A., GOZE E., LEBON E. and WERY J., 2006. A model-based diagnosis tool to evaluate the water stress experienced by grapevine in field sites. *European Journal of Agronomy* 25(1): 49-59.

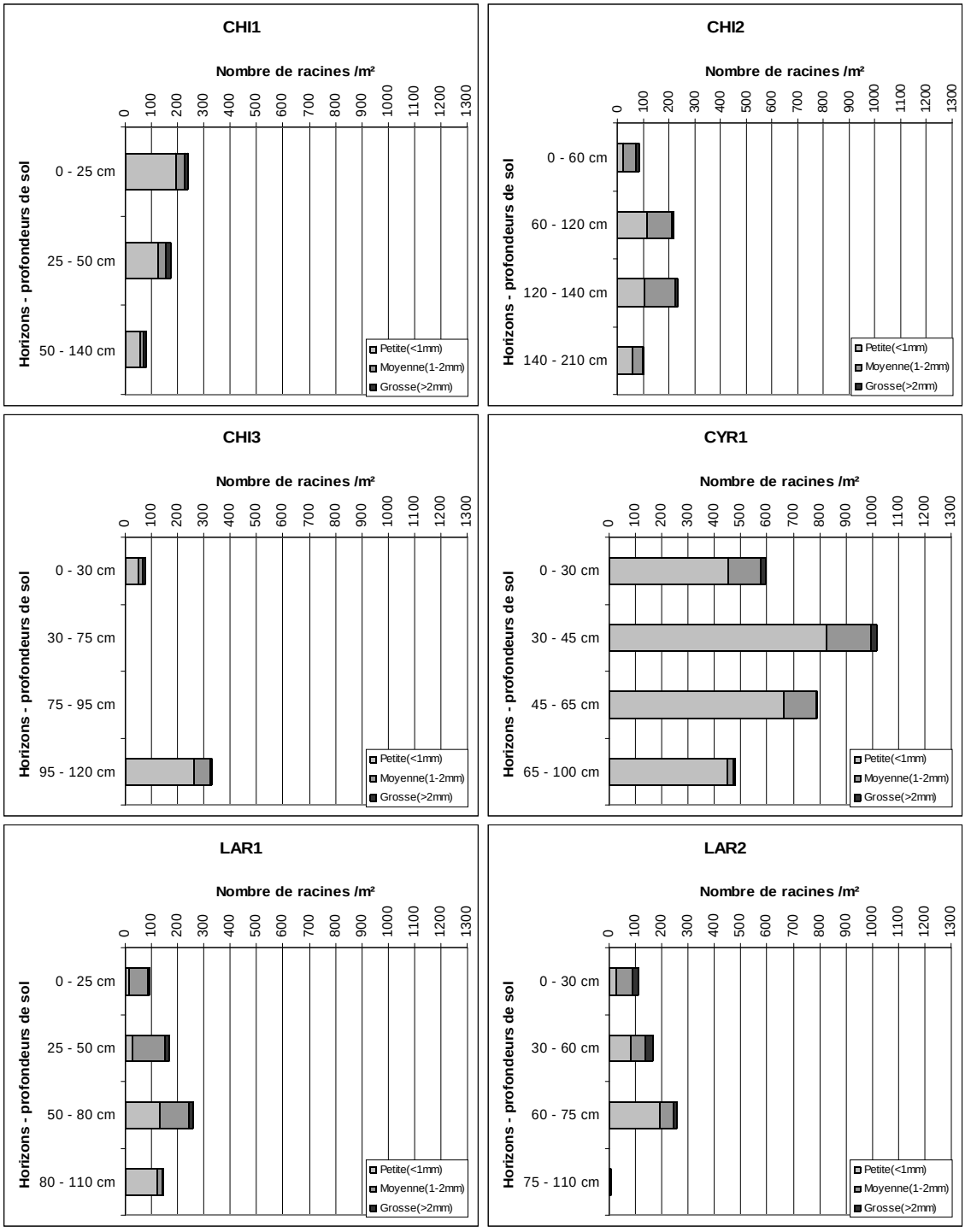
RIOU C. and LEBON E., 2000. Application d'un modèle de bilan hydrique et de la mesure de la température de couvert au diagnostic du stress hydrique de la vigne à la parcelle. *Bulletin de l'O.I.V.* 73(837-838): 755-764.

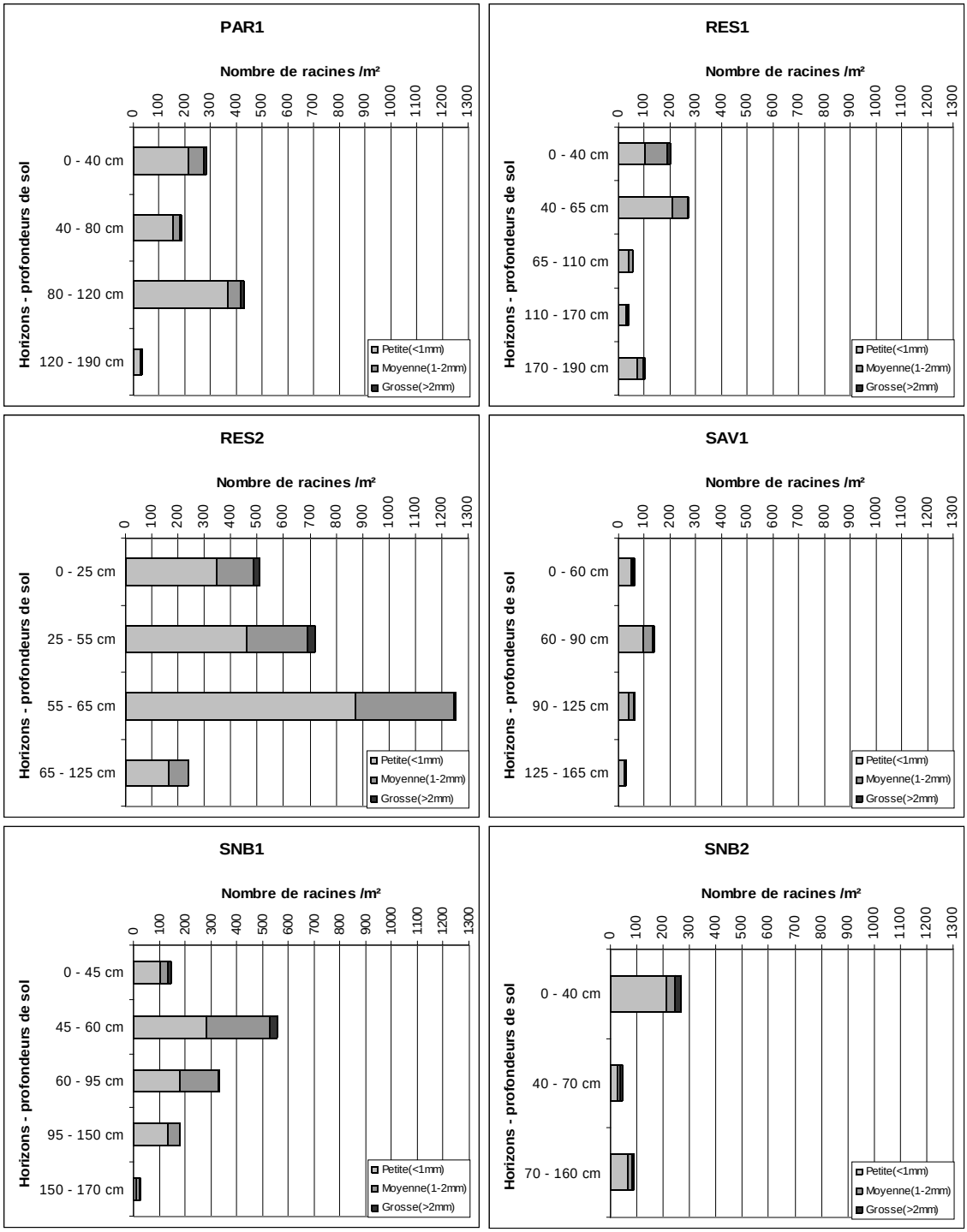
TONIETTO J. and CARBONNEAU A., 2004. A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology* 124(1/2): 81-97.

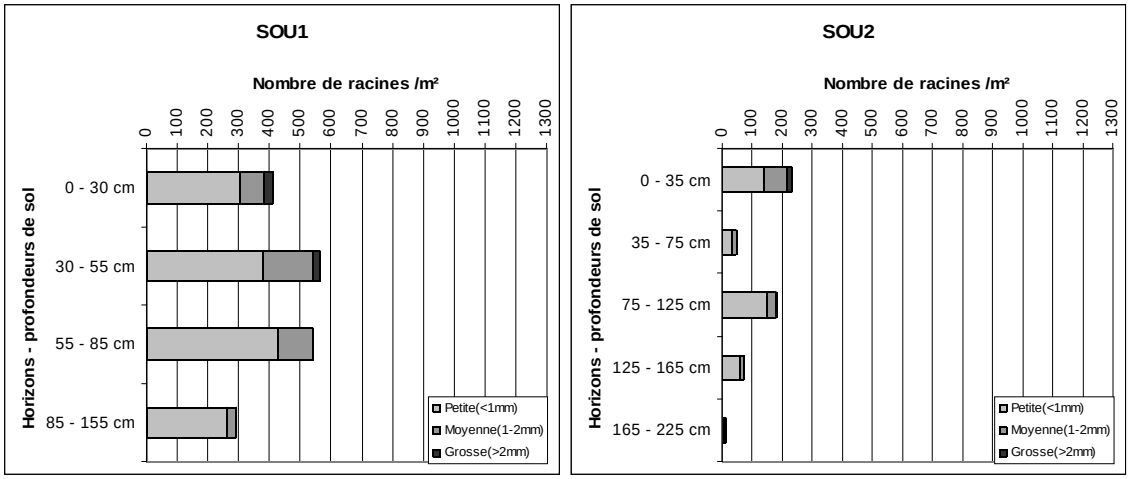
VAN LEEUWEN C., GARNIER C., AGUT C., BACULAT B., BARBEAU G., BESNARD E., BOIS B., BOURSIQUOT J. M., CHUINE I., DESSUP T., DUFOURCQ T., GARCIA DE CORTAZAR ATAURI I., MARGUERIT E., MONAMY C., KOUNDOURAS S., PAYAN J.-C., PARKER A., RENOUF V., RODRIGUEZ-LOVELLE B., ROBY J.-P., TONIETTO J. and TRAMBOUZE W., 2008. Heat requirements for grapevine varieties is essential information to adapt plant material in a changing climate. *VIIth International terroir Congress, Changins (Suisses) proceedings :* 222-227.


Craies sablo-limono-glauconieuses et micacées du Turonien moyen
Argiles à silex du Sénonien
Sables à sables argileux du Sénonien
Alluvions de la Loire du Quaternaire
Alluvions de la Vienne du Quaternaire
CYR1
SOU1
RES2
CHI1
LAR1
LAR2
SOU2
PAR1
SNB2
SNB1
RES1
SAV1
CHI2
CHI3
10 cm
50 cm
100 cm
150 cm
200 cm
A Argile
S Sable
SA Sable argileux
SL Sable limoneux
LAS Limon argilo-sableux
ALO Argile Lourde
LS Limon sableux
Codification selon la nomenclature pédologique

Annexe 3 : Profils racinaires des quatorze parcelles d'étude




PAR1
Nombre de racines /m²
0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000 1100 1200 1300
Horizons - profondeurs de sol
0 - 40 cm
40 - 80 cm
80 - 120 cm
120 - 190 cm
Petite(<1mm)
Moyenne(1-2mm)
Grosse(>2mm)
RES1
Nombre de racines /m²
0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000 1100 1200 1300
Horizons - profondeurs de sol
0 - 40 cm
40 - 65 cm
65 - 110 cm
110 - 170 cm
170 - 190 cm
Petite(<1mm)
Moyenne(1-2mm)
Grosse(>2mm)
RES2
Nombre de racines /m²
0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000 1100 1200 1300
Horizons - profondeurs de sol
0 - 25 cm
25 - 55 cm
55 - 65 cm
65 - 125 cm
Petite(<1mm)
Moyenne(1-2mm)
Grosse(>2mm)
SAV1
Nombre de racines /m²
0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000 1100 1200 1300
Horizons - profondeurs de sol
0 - 60 cm
60 - 90 cm
90 - 125 cm
125 - 165 cm
Petite(<1mm)
Moyenne(1-2mm)
Grosse(>2mm)
SNB1
Nombre de racines /m²
0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000 1100 1200 1300
Horizons - profondeurs de sol
0 - 45 cm
45 - 60 cm
60 - 95 cm
95 - 150 cm
150 - 170 cm
Petite(<1mm)
Moyenne(1-2mm)
Grosse(>2mm)
SNB2
Nombre de racines /m²
0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000 1100 1200 1300
Horizons - profondeurs de sol
0 - 40 cm
40 - 70 cm
70 - 160 cm
Petite(<1mm)
Moyenne(1-2mm)
Grosse(>2mm)


SOU1
Nombre de racines /m²
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
1100
1200
1300
Horizons - profondeurs de sol
0 - 30 cm
30 - 55 cm
55 - 85 cm
85 - 155 cm
Petite(<1mm)
Moyenne(1-2mm)
Grosse(>2mm)
SOU2
Nombre de racines /m²
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
1100
1200
1300
Horizons - profondeurs de sol
0 - 35 cm
35 - 75 cm
75 - 125 cm
125 - 165 cm
165 - 225 cm
Petite(<1mm)
Moyenne(1-2mm)
Grosse(>2mm)

Annexe 4 : Calcul de la réserve en eau utile maximale des parcelles d'étude selon la méthode de Goulet et al. (2004)

Parcelles	Epaisseurs des horizons (en cm)		Terre fine (en%)	Densité apparente	Humidité à la capacité au champ (en %)	Humidité au point de flétrissement (en %)	Réserve utile en eau maximale (en mm)	
CHI1	H1	25	86	1.47	19	8	33	156
	H2	25	70	1.47	19	8	26	
	H3	120	70	1.13	31	21	97	
CHI2	H1	60	93	1.34	9	4	38	124
	H2	60	71	1.42	6	4	13	
	H3	20	96	1.44	28	15	36	
	H4	100	52	1.40	9	4	37	
CHI3	H1	30	80	1.31	9	4	17	192
	H2	45	58	1.52	8	4	19	
	H3	20	59	1.52	8	4	9	
	H4	90	88	1.44	28	15	148	
CYR1	H1	30	100	1.29	22	9	26	103
	H2	15	100	1.15	22	14	24	
	H3	20	70	1.02	31	12	27	
	H4	35	50	0.90	28	12	25	
LAR1	H1	25	68	1.02	48	25	39	131
	H2	25	69	1.02	48	25	40	
	H3	30	70	0.95	44	33	21	
	H4	50	60	0.95	44	33	32	
LAR2	H1	30	71	1.07	32	21	26	85
	H2	30	89	1.07	32	21	32	
	H3	15	40	0.95	44	33	6	
	H4	35	60	0.95	44	33	21	
PAR1	H1	40	99	1.34	12	4	45	188
	H2	40	99	1.50	9	2	39	
	H3	40	97	1.64	14	7	45	
	H4	50	100	1.64	14	7	59	
RES1	H1	40	85	1.48	8	3	24	130
	H2	25	39	1.48	8	3	7	
	H3	45	91	1.34	5	3	11	
	H4	60	58	1.34	5	3	10	
	H5	60	59	1.44	28	12	78	
RES2	H1	25	93	1.23	22	12	29	118
	H2	30	96	1.23	22	12	37	
	H3	10	70	1.02	31	12	13	
	H4	60	50	0.93	28	14	39	
SAV1	H1	60	100	1.55	8	2	51	133
	H2	30	99	1.46	8	2	24	
	H3	35	72	1.52	8	4	18	
	H4	80	71	1.52	8	4	40	

SNB1	H1	45	94	1.29	7	3	23	80
	H2	15	73	1.57	5	2	6	
	H3	35	76	1.57	5	2	14	
	H4	110	46	1.52	8	4	37	
SNB2	H1	40	100	1.47	6	2	24	206
	H2	30	100	1.47	6	2	18	
	H3	90	99	1.73	12	1	163	
SOU1	H1	30	95	1.45	23	13	42	135
	H2	25	100	1.44	19	12	26	
	H3	30	70	1.48	14	8	20	
	H4	70	50	1.319	16	6	46	
SOU2	H1	35	100	1.50	13	4	46	219
	H2	40	99	1.37	10	2	41	
	H3	50	89	1.64	14	7	52	
	H4	40	100	1.59	11	5	37	
	H5	60	100	1.52	8	4	44	

Annexe 5 : Valeurs des variables d'entrée et des variables composites pour les parcelles d'étude :

	CHI1	CHI2	CHI3	CYR1	LAR1	LAR2	PAR1	RES1	RES2	SAV1	SNB1	SNB2	SOU1	SOU2
RUM	156	124	192	103	131	85	188	130	111	133	80	206	135	219
CPS	9	8	38	1	14	21	1	26	3	0	10	0	1	0
DRM	2	1	1	2	2	2	1	1	2	1	1	1	2	1
VIG_MIL	**2,4**	**2,3**	**2,6**	**1,9**	**2,1**	**1,5**	**3,0**	**2,2**	**2,0**	**2,4**	**2,0**	**3,0**	**2,2**	**3,0**
VIG_PG	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
VIG_C	0	0	0	2,75	0	0	0	0	2,75	0	0	0	2,75	0
VIG_ITK	**3,8**	**3,7**	**3,8**	**2,0**	**2,8**	**3,6**	**3,8**	**3,2**	**2,2**	**3,8**	**2,9**	**3,8**	**3,0**	**3,8**
HCC	28	10	18	25	47	37	12	11	26	8	7	9	18	11
DN	5	1	1	2	5	5	3	2	3	2	2	5	3	3
CSS	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
PED	**1,5**	**2,9**	**2,8**	**2,4**	**1,1**	**1,1**	**2,6**	**2,9**	**2,0**	**2,9**	**2,9**	**2,1**	**2,4**	**2,6**
ALT	95	37	37	50	108	100	68	46	65	34	45	48	58	55
EXP	3	2	2	2	2	3	3	2	3	2	2	2	2	2
OP	2	3	3	3	3	3	2	2	3	2	2	2	3	3
TOP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MES	**2,0**	**2,7**	**2,7**	**2,7**	**2,0**	**2,3**	**2,3**	**2,3**	**2,7**	**2,3**	**2,3**	**2,3**	**2,5**	**2,5**
PIC	1	3	3	1	3	3	3	2	3	3	2	1	1	1
PRE_MIL	**2,2**	**2,0**	**1,9**	**2,4**	**1,5**	**1,7**	**1,7**	**2,2**	**1,9**	**1,9**	**2,2**	**2,1**	**2,3**	**2,2**

Variables composites :

VIG_MIL : vigueur liée aux facteurs du milieu [1;3]
MES : mésoclimat thermique [1;3]
PED : pédoclimat thermique [1;3]
PRE_MIL : précocité liée aux facteurs du milieu [1;3]
VIG_ITK : vigueur liée aux facteurs du milieu et aux pratiques [1;4]

Variables d'entrée :

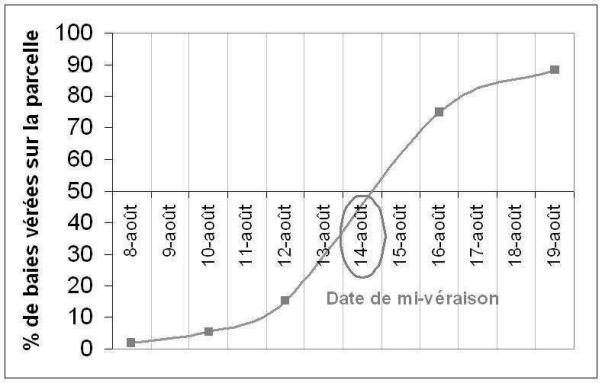
RUM : réserve utile en eau du sol maximale (mm)
CPS : pourcentage de cailloux sur le profil du sol (%)
DRM : dureté de la roche-mère [1;3]
VIG_PG : vigueur conférée par le porte-greffe [1;3]
VIG_C : contrainte de l'entretien du sol sur la vigueur de la vigne [1;3]
HCC : humidité à la capacité au champ (%)
DN : drainage naturel [1;5]
CSS : couleur de surface du sol [1;3]
ALT : altitude (mm) ; EXP : exposition [1;3]
OP : ouverture du paysage [1;3]
TOP : topograhie (1 : thalweg ou bas de pente ; 0 : autre)
PIC : profondeur du pic racinaire [1;3]

Annexe 6 : Variables caractérisant la précocité des quatorze parcelles d'étude et les deux années de suivis (2002 et 2005):

	D50	F50	V50	IM31	P_iD	P_iF	P_iV	P_iM31
CHI102	98.0	166.3	242.0	272.5	99.4	99.4	98.6	99.8
CHI202	96.5	164.8	237.5	275.9	100.9	100.3	100.5	98.5
CHI302	103.8	165.3	238.5	280.9	93.5	100.0	100.1	96.7
CYR102	97.5	166.3	238.5	277.0	99.9	99.4	100.1	98.1
LAR102	94.5	167.3	243.0	276.5	103.0	98.8	98.2	98.3
LAR202	90.5	165.5	235.5	264.3	107.1	99.8	101.3	102.8
PAR102	94.5	164.8	238.0	270.4	103.0	100.3	100.3	100.6
RES102	103.8	165.5	235.0	266.5	93.5	99.8	101.5	102.0
RES202	100.5	167.0	243.0	275.2	96.8	98.9	98.2	98.8
SAV102	96.0	162.5	235.8	266.1	101.4	101.6	101.2	102.1
SNB102	100.8	165.8	239.8	266.8	96.5	99.7	99.5	101.9
SNB202	100.3	165.0	237.8	272.4	97.0	100.1	100.4	99.8
SOU102	94.8	163.8	238.0	269.0	102.7	100.9	100.3	101.1
SOU202	92.0	163.3	238.5	273.2	105.5	101.2	100.1	99.5
CHI105	95.5	161.8	227.3	243.7	100.7	99.7	100.2	100.7
CHI205	95.8	160.0	226.8	245.4	100.4	100.8	100.4	100.0
CHI305	102.3	161.8	229.0	249.6	93.7	99.7	99.4	98.3
CYR105	96.3	162.8	227.8	246.6	99.9	99.1	100.0	99.5
LAR105	94.3	162.3	229.8	246.7	102.0	99.4	99.1	99.5
LAR205	94.5	162.3	228.0	243.9	101.7	99.4	99.9	100.6
PAR105	95.0	160.8	226.5	244.7	101.2	100.3	100.5	100.3
RES105	96.8	161.0	226.8	244.0	99.4	100.2	100.4	100.6
RES205	98.5	163.0	231.0	248.5	97.6	98.9	98.6	98.7
SAV105	95.0	157.3	226.8	243.4	101.2	102.5	100.4	100.8
SNB105	95.5	162.3	226.3	242.4	100.7	99.4	100.6	101.2
SNB205	96.5	160.5	226.8	245.2	99.7	100.5	100.4	100.1
SOU105	95.0	161.3	227.3	244.5	101.2	100.0	100.2	100.4
SOU205	95.8	161.3	228.3	247.3	100.4	100.0	99.8	99.2

D50 : date de mi-débourrement ; F50 : date de mi-floraison ; V50 : date de mi-véraison
IM31 : date à laquelle les parcelles avaient atteint un indice de maturité (Sucre g/l / Acidité totale g d'H_2SO_4/l) égal à 31.
P_iD : indice de précocité de débourrement ; P_iF : indice de précocité de floraison
P_iV : indice de précocité de véraison ; P_iM31 : indice de précocité de maturité
Les indices de précocité sont calculés suivant la méthode de Barbeau et al. (1998).

Exemple de cinétique du stade phénologique de la véraison et détermination de la date de mi-véraison (Cas de la parcelle SNB2 en 2005) :



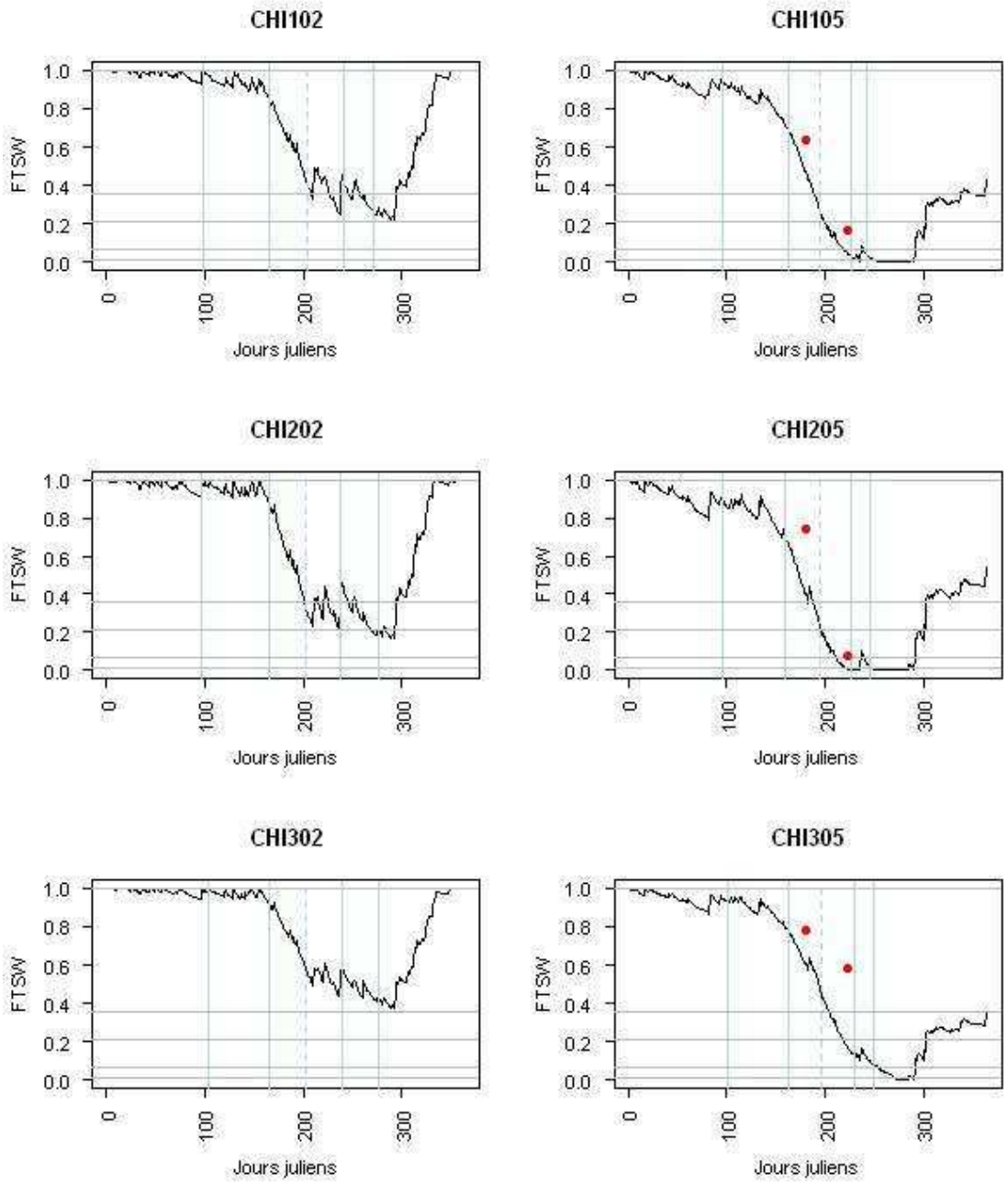
Annexe 7 : Variables caractérisant le développement végétatif et reproducteur des quatorze parcelles d'étude et les deux années de suivis (2002 et 2005) :

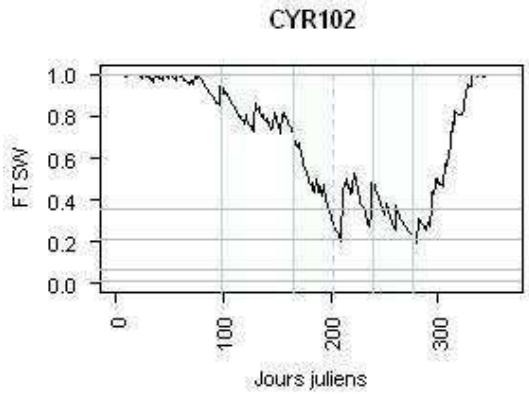
	PBT	SFE	RE	SFE/RE	PUI
CHI102	0.16	1.15			
CHI202	0.21	1.26	0.85	1.49	0.27
CHI302	0.17	1.18	0.87	1.35	0.26
CYR102	0.21	1.60			
LAR102	0.26	1.19			
LAR202	0.15	1.06	0.95	1.11	0.27
PAR102	0.20	1.14	1.38	0.83	0.37
RES102	0.14	1.18	1.29	0.92	0.33
RES202	0.15	1.13	0.90	1.25	0.25
SAV102	0.08	0.87	0.91	0.95	0.22
SNB102	0.20	1.23	1.06	1.17	0.31
SNB202	0.19	1.46	1.43	1.03	0.38
SOU102	0.14	1.21	1.31	0.92	0.33
SOU202	0.22	1.26	1.40	0.90	0.39
CHI105	0.17	1.23	0.79	1.55	0.24
CHI205	0.21	1.28	0.79	1.62	0.26
CHI305	0.23	1.22	1.03	1.18	0.32
CYR105	0.26	1.60	1.15	1.40	0.36
LAR105	0.25	1.29	1.26	1.03	0.37
LAR205	0.12	1.22	0.75	1.62	0.21
PAR105	0.17	1.10	1.12	0.98	0.31
RES105	0.15	1.18	0.93	1.26	0.26
RES205	0.14	1.10	1.07	1.03	0.28
SAV105	0.08	0.82	0.70	1.16	0.18
SNB105	0.19	1.31	0.62	2.13	0.22
SNB205	0.16	1.45	0.94	1.54	0.27
SOU105	0.12	1.14	0.94	1.21	0.25
SOU205	0.22	1.28	1.32	0.97	0.38

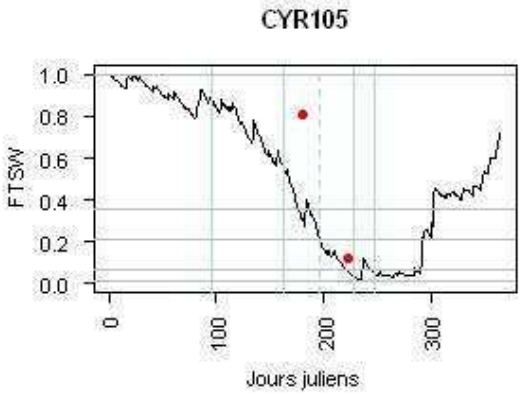
PBT : poids de bois de taille (kg/m²)
SFE : surface foliaire exposée (m²/m²) calculée suivant la méthode de Carbonneau (1983)
RE : poids de récolte (kg/m²)
SFE/RE : rapport entre la surface foliaire exposée et le poids de réccolte
PUI : puissance ; PUI = 0,5 PBT +0,2 RE

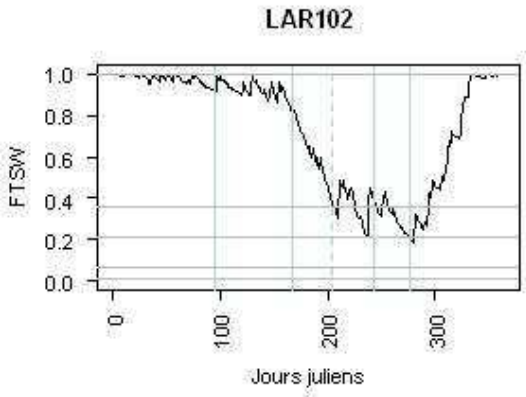
Annexe 8 : Bilans hydriques des quatorze parcelles d'étude et les deux années de suivis (2002 et 2005) :

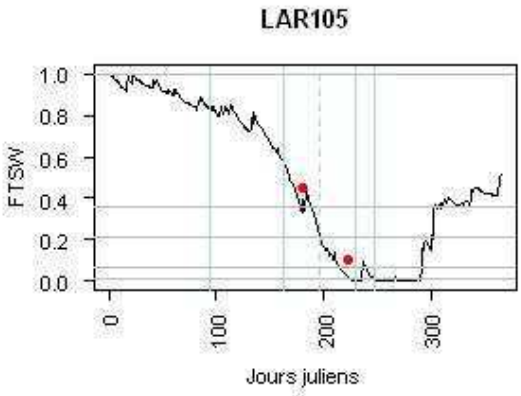
Les bilans hydriques sont calculés en utilisant le modèle Walis (Cellette et al., 2010).
FTSW : Fraction d'eau transpirable par la vigne, elle correspond au rapport entre la réserve utile en eau du sol le jour du calcul et la réserve utile en eau maximale.
Les points correspondent à la FTSW calculée à partir des mesures de potentiels de base (Pb) selon l'équation FTSW = $1{,}0572.e^{(5{,}3452.Pb)}$ (Lebon et al., 2003).



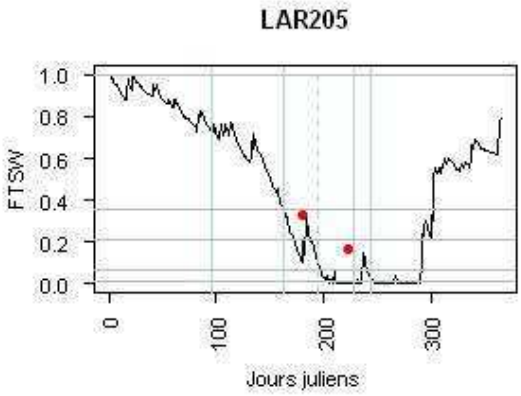

CYR102
FTSW
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0
100
200
300
Jours juliens

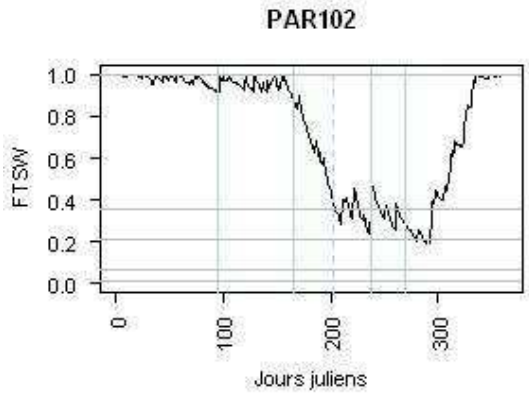

CYR105
FTSW
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0
100
200
300
Jours juliens

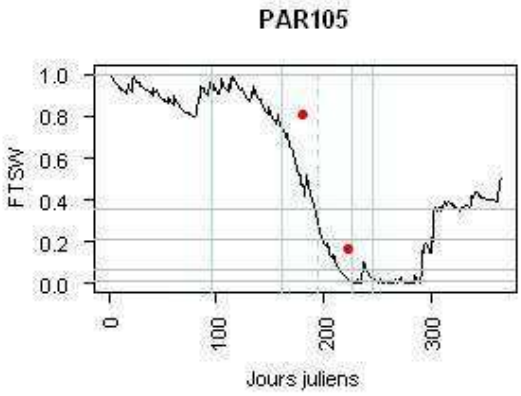

LAR102
FTSW
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0
100
200
300
Jours juliens

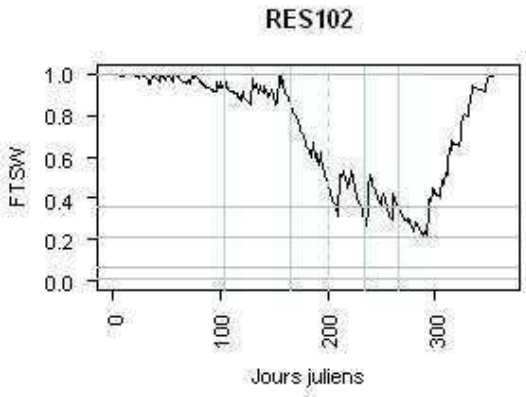

LAR105
FTSW
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0
100
200
300
Jours juliens

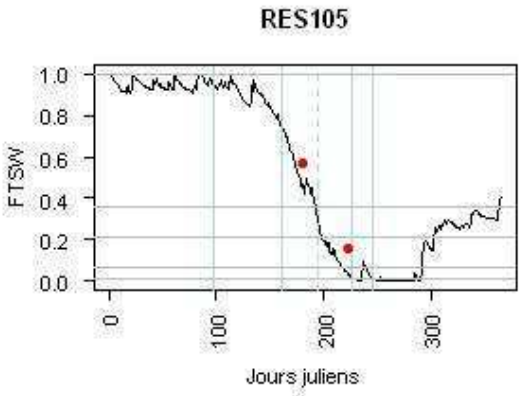
LAR202
FTSW
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0
100
200
300
Jours juliens

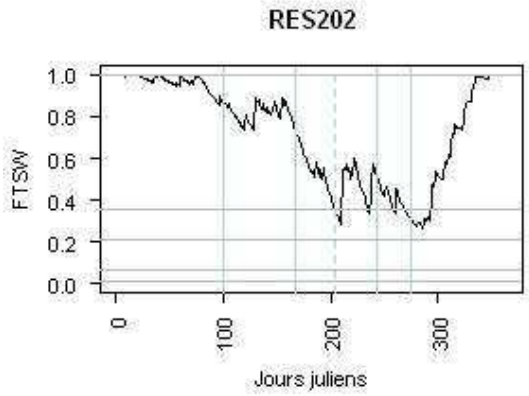

LAR205
FTSW
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0
100
200
300
Jours juliens

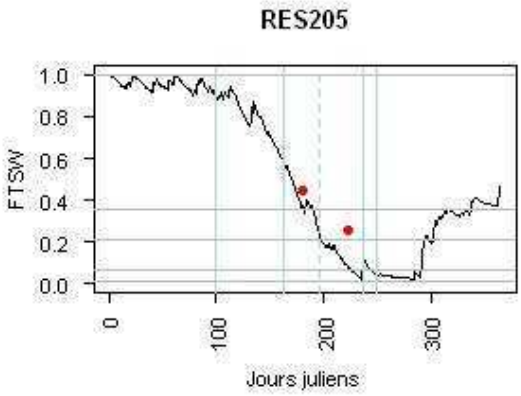

PAR102
FTSW
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0
100
200
300
Jours juliens

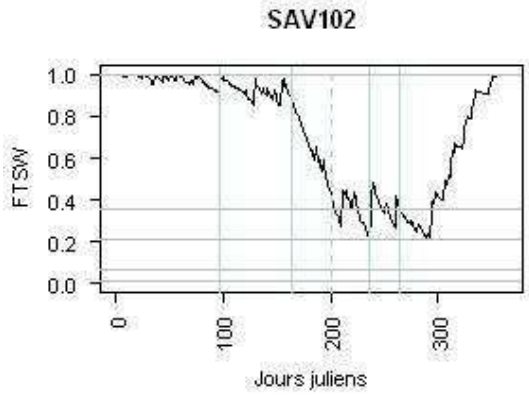

PAR105
FTSW
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0
100
200
300
Jours juliens

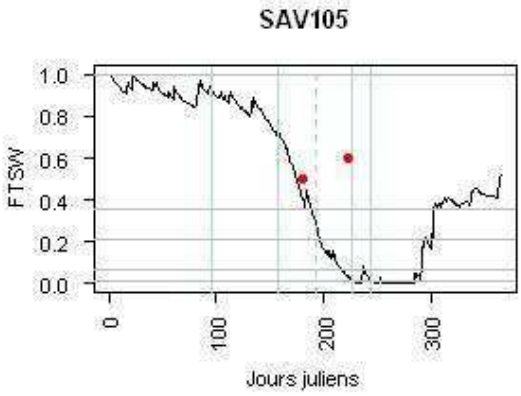

RES102
FTSW
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0
100
200
300
Jours juliens

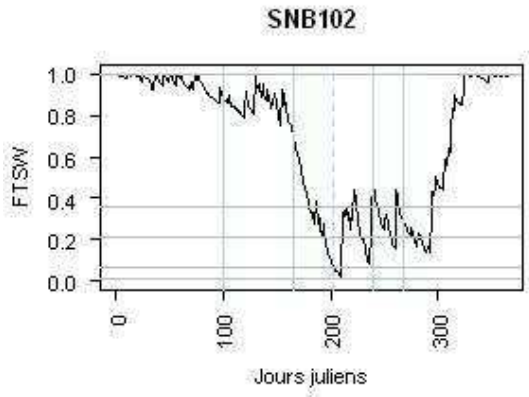

RES105
FTSW
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0
100
200
300
Jours juliens

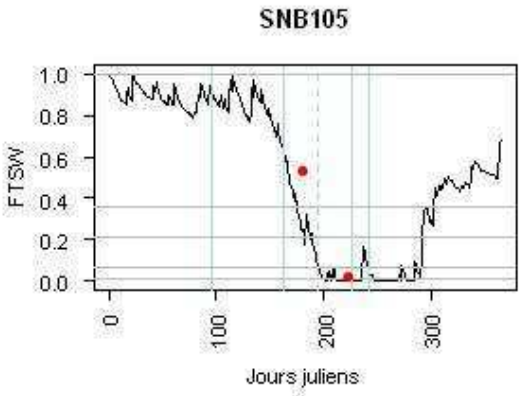

RES202
FTSW
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0
100
200
300
Jours juliens

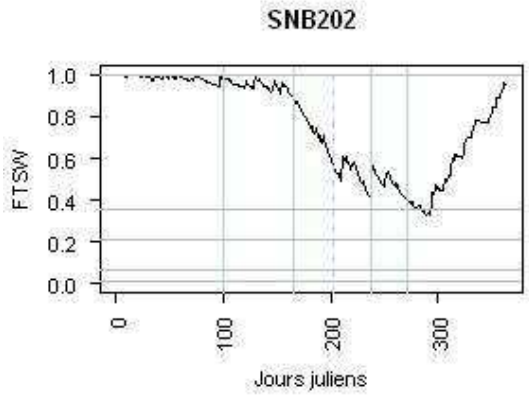

RES205
FTSW
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0
100
200
300
Jours juliens

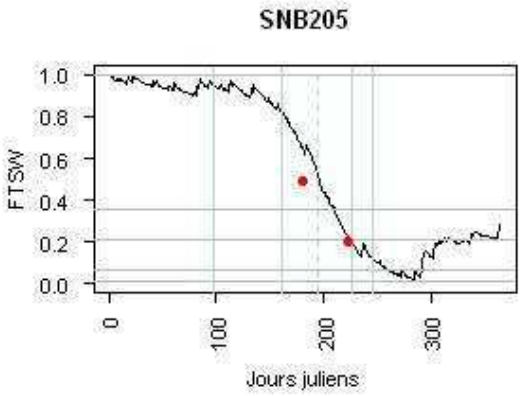

SAV102
FTSW
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0
100
200
300
Jours juliens

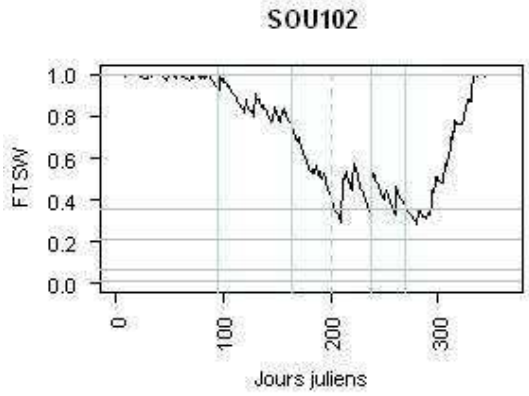

SAV105
FTSW
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0
100
200
300
Jours juliens

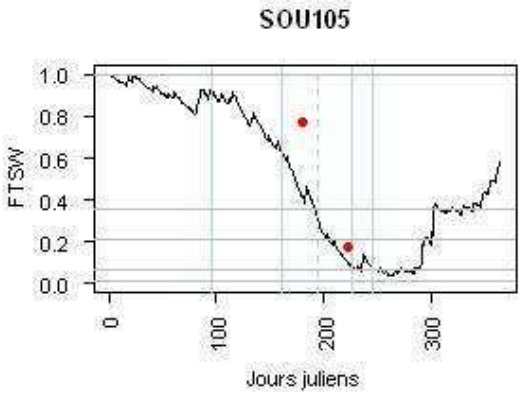

SNB102
FTSW
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0
100
200
300
Jours juliens

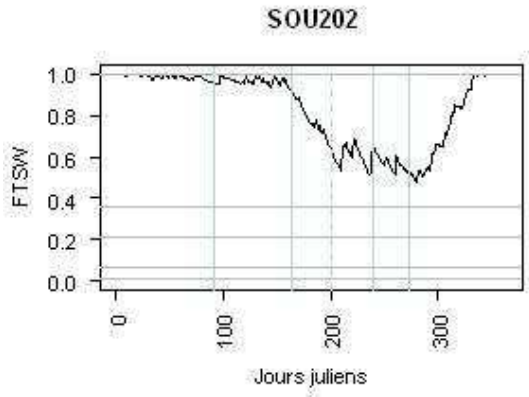

SNB105
FTSW
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0
100
200
300
Jours juliens

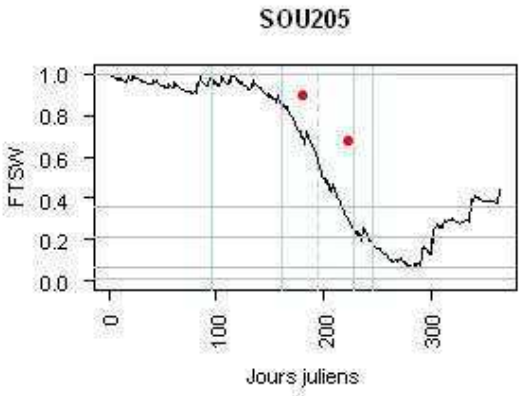

SNB202
FTSW
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0
100
200
300
Jours juliens


SNB205
FTSW
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0
100
200
300
Jours juliens


SOU102
FTSW
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0
100
200
300
Jours juliens


SOU105
FTSW
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0
100
200
300
Jours juliens


SOU202
FTSW
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0
100
200
300
Jours juliens


SOU205
FTSW
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0
100
200
300
Jours juliens

Annexe 9 : Critères cités par les neufs experts professionnels, lors des entretiens individuels, pour caractériser le raisin de Cabernet franc.

Critères et nombres de citations		**Méthode**
Etat sanitaire / Pourriture grise	9	Observation
Teneur en sucre / Degré d'alcool probable	9	Analyse chimique
Arômes des baies : végétal ou non; fruit frais au fruit sur-mur	9	Dégustation
Acidité totale	6	Analyse chimique
Azote assimilable	5	Analyse chimique
pH	5	Analyse chimique
Composés phénoliques	4	Analyse chimique
Couleur des pépins	3	Dégustation
Qualité des tanins des pépins et de la pellicule	3	Dégustation
Indice de maturité : rapport sucre/acidité totale	2	Analyse chimique
Date d'arrêt du chargement en sucre	2	Analyse chimique
Epaisseur de la pellicule	2	Dégustation
Facilité de détachement des baies du pédicelle	2	Dégustation
Fermeté de la pellicule	2	Dégustation
Quantité de pulpe qui reste sur la pellicule	2	Dégustation
Croquant des pépins	2	Dégustation
Couleur des baies à la vendange	1	Observation
Taille des baies	1	Observation
Homogénéité de la couleur des baies	1	Observation
Poids d'une grappe	1	Observation
Couleur du moût	1	Analyse chimique
Géosmine - Gout moisi terreux	1	Analyse chimique
Acide malique	1	Analyse chimique
Sucre à la date d'arrêt de chargement	1	Analyse chimique
Teneur en polysaccharides libérables	1	Analyse chimique
Potentiel d'extraction des polyphénols	1	Analyse chimique
Dilacération de la pellicule	1	Dégustation
Couleur de la pulpe	1	Dégustation
Texture de la pulpe	1	Dégustation
Arômes spécifiques des pépins (noisette)	1	Dégustation
Amertume des pépins	1	Dégustation
Fermeté de la baie	1	Dégustation
Couleur laissée sur la langue	1	Dégustation

Annexe 10 : Protocole de vinification des vins des quatorze parcelles d'étude.

Opération :	Description
Vendanges	Séparation des grappes avec pourriture, des grappes saines (dans des bacs différents). Bacs non tassés. Env. 12-15kg par bac.
Assemblage du jus et répartition dans les cuves de fermentation	Dans une cuve de 200 litres (si nécessaire). Volume équivalent pour toutes les cuves (repère). Homogénéisation du moût par léger brassage. Même masse de moût pour les deux cuves (200g près).
Sulfitage	3-8 g/HL selon état sanitaire et acidité.
Suivi fermentaire	Pas de maîtrise de température. T ambiante maintenue à 20°C. Ajout d'azote pour amener à 150 mg/l (si nécessaire) ; à Vmax. Apport d'O2 par cliquage 1 minute à Vmax.
Levurage	Levurage 12h après le sulfitage : souche « ITV » 20g/hl.
Remontages.	Par deux basculements complets /jours pendant 2 jours, une fois ensuite jusqu'à la fin de la FA. A chaque basculement, 4-5 secondes d'attente cuve renversée avant rétablissement
Chaptalisation	Chaptalisation : si degré inf. à 12.8 %vol. – à densité 1030.
Fin de FA	Décuvage dans garde-vin.
Pressurage	Pressurage avec filtre-presse
Mise en garde-vins	Ensemencement en bactéries lactiques.
Fin FML	Soutirage. Mise en bonbonnes.
Sulfitage	Sulfitage 5g/Hl

Agro 2010, the XI ESA Congress, Montpellier.

Design of a model to predict berry composition and wine style according to soil factors, climate and winegrowers' practices.

Coulon C., Barbeau G., Morlat R. Thiollet-Scholtus M.,

INRA-UE1117 Vigne et Vin, UMT Vinitera, 42 rue Georges Morel, F-49071 Beaucouzé, France
cecile.coulon@angers.inra.fr

The evolution of the economical and environmental context (reduction of pesticides use, increase of energetic cost and climate change) requires an adaptation and/or optimization of the winegrower's practices. Our objective is to propose a systemic modeling approach to predict the berry composition and wine style according to environmental factors (soil and climate) and cropping practices, at the plot and vintage scales. This model will be further coupled with an evaluation of economic costs and environmental impacts in order to build a decision aid tool. We focus here on the systemic modeling design.

Materials and Methods

A modeling of the system including environmental factors, practices, vine ecophysiology, berry composition (sugar, acidity, assimilable nitrogen, anthocyanins and phenolic compounds) and wine style (determined by sensorial criteria: aromas, acidity, astringency, color) is complex, so the question is what knowledge must be integrated and how it should be formalized in a systemic approach. First, we consider berry composition and wine style by mean of a typology, the type of berry composition *e.g.* low acidity, high alcool, high anthocyanins and high phenolics compounds determines the wine style that can be produced *e.g wine for ageing*. We use fuzzy partitions (Zadeh, 1965) to characterize the level of berry compounds. The fuzzy logic allows to eliminate the sharp transition between low and high classes. According to berry composition type, the wine style is determined by expertise of oenologists. Next, a two step strategy is proposed: 1. The variables influencing berry composition and their interactions are identified using previously published data and statistical analyses of (i). survey of practices and environmental factors databases and (ii). data from experimental plots; next an *influence diagram* is built to design a *conceptual model*. The influence diagram consists of boxes and arrows that represent variables of the system, causal relationships and their relative effect on berry composition. The model will be inserted into a software to aid the winegrowers to choose their croppping practices so its design is thought according to this future use. The input variables will be accessed in databases integrated in the software or easily measurable on plots by the winegrower. Main of input variables are yet available in the Mid-Loire valley thanks to the 'Terroir cartography' realized by INRA-UE117 and "Cellule Terroirs Viticoles" teams. Indicators based on aggregations of variables must also be easily understandable and bring a decision aid. 2. The environmental and cropping variables are aggregated combining quantitative (equations) and qualitative methods (decision rules with fuzzy logic) to predict berry composition and wine style type. The aggregations of the variables and the behavior of the model will be validated using sensitivity analyses and statistical comparisons with measured data.

Results and discussion

Three variables, named 'functional variables', have a direct effect on grape composition and wine style: soil water availability, earliness of phenological stages and vine vigor (Carey et al., 2007; Morlat et al., 2001; Tesic et al., 2002). Most of the 'terroir' studies only characterize the environmental factors (Vaudour, 2003), nevertheless they interact with practices (including choice of plant material) to determine these three variables (Tesic et al., 2007, Thiollet-Scholtus et al., 2008). The combined level of each of these variables will influence berry composition (Jackson et al., 1993). Each variable can be estimated by measurements during the vine's cycle or by the use of a model. Soil water availability can be estimated through the water balance model (Delpuech et al., 2009) depending on maximum soil water content, rainfall, runoff, type of soil and canopy management. The C13/C12 ratio in grape sugars allows to assess global vine water uptake conditions between veraison and harvest (Van Leeuwen et al., 2001). Phenological stages can be directly

observed on plots and earliness of plant development can be estimated according to indexes that combine dates of flowering and veraison (Barbeau et al., 1998). Vigor estimations by measuring pruning weight are linked with vegetative development and yield (Carbonneau et al., 2007). According to these relations identified in the published data we chose to predict (a). the three functional variables influencing berry composition according to environmental factors and practices and (b). the berry composition and wine style types according to the combination of the level (low or high) of the three functional variables (e.g low vigor; high precocity and low water supply). Thus the model could be divided in two independent sub-models. The global conceptual model is presented in fig. 1.

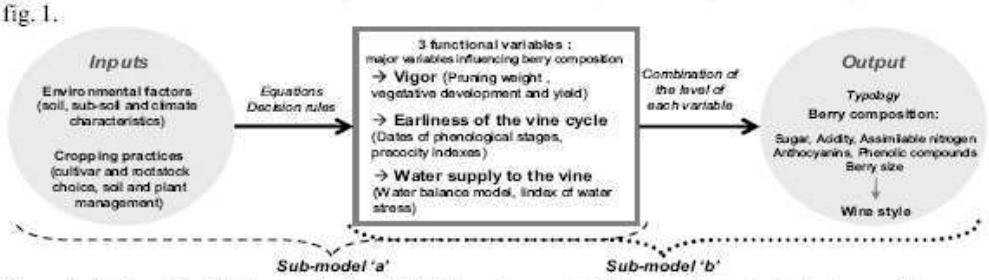


Figure 1: Design of a global conceptual model to link environmental factors and cropping techniques with berry composition and wine style.

Conclusions

The functional variables of the 'vine system'– earliness of the vine cycle, water supply to the vine and vigor – result from the interactions between environmental factors and cropping practices. They are measurable and can be predicted. The combination of the level (low/high) of these three variables might allow to predict berry composition and wine style. Conversely, from the choice of a given type of final product it would be possible to orientate the cropping practices so as they contribute to an appropriate functioning of the vine, in terms of earliness of the vine cycle, water intake and vigor. The design of this two-ways model constitutes a methodological advance on the combined role of environmental factors and cropping practices on berry quality and wine style.

This project is led thanks to 'INRA-SAD' and 'Région Pays de la Loire' financial support and 'UMT Vinitera' teams (Angers), 'UMR Analyse des systèmes et biométrie' (Montpellier) and 'La cave des vignerons de Saumur' scientific and technical supports.

References

Barbeau, G., Asselin, C. and Morlat, R. (1998). Estimate of the viticultural potential of the Loire valley "terroirs" according to a vine's cycle precocity index Bulletin de l'OIV 71(805/806): 247-262.

Carbonneau, A., Deloire, A. and Jaillard, B. (2007). La vigne. Physiologie, terroir, culture., Dunod, 441 pp.

Carey, V., Archer, E., Barbeau, G. and Saayman, D. (2007). The use of local knowledge relating to vineyard performance to identify viticultural terroirs in Stellenbosch and surrounds Acta Horticulturae(No.754).

Delpuech, X., Celette, F., Ripoche, A., Barbeau, G. and Gary, C. (2009). Evaluation of a water balance model for cover cropped vineyards in Mediterranean and Altantic climate conditions. VI International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops., Vina del Mar, Chili,2-6 novembre 2009.

Jackson, D.I., and P.B. Lombard. 1993. Environmental and Management Practices Affecting Grape Composition and Wine Quality - A Review. American Journal of Enology and Viticulture 44:409-430.

Morlat, R., Barbeau, G., Asselin, C. and Besnard, E. (2001). Terroir Viticole : de la recherche à la valorisation par le vigneron. Un raisin de qualité : de la vigne à la cuve., Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin. Hors-série.

Tesic, D., Keller, M. and Hutton, R. J. (2007). Influence of Vineyard Floor Management Practices on Grapevine Vegetative Growth, Yield, and Fruit Composition. American Journal of Enology and Viticulture 58:1: 1-11.

Tesic, D., Woolley, D. J., Hewett, E. W. and Martin, D. J. (2002). Environmental effects on cv Cabernet Sauvignon (Vitis vinifera L.) grown in Hawke's Bay, New Zealand. 1. Phenology and characterisation of viticultural environments Australian Journal of Grape and Wine Research 8(1): 15-26.

Thiollet-Scholtus, M., Coulon, C. and Morlat, R. (2008). Comparaison d'itinéraires techniques viticoles et d'unités de terroir en moyenne vallée de la Loire à l'aide d'un réseau de parcelles. OIV, Verona, Italie,16-20 juin 2008, OIV.

Van Leeuwen, C., Gaudillère, J.-P. and Tregoat, O. (2001). L'évaluation du régime hydrique de la vigne à partir du rapport isotopique 13C/12C. L'intérêt de sa mesure sur les sucres du moût à maturité. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin 35(4): 195-205.

Vaudour, E. (2003). Les terroirs viticoles. Définitions, caractérisation et protection., Dunod, 293 pp.

Zadeh, L.A. 1965. Fuzzy Sets. Information and Control 8:338-353.

Design of a model to predict berry composition and wine style according to soil factors, climate and winegrowers' practices.

Coulon Cécile, Barbeau Gérard, Morlat René, Thiollet-Scholtus Marie

INRA-UE1117, UMT Vinitera, 42 rue Georges Morel, 49071 Beaucouzé, France

Introduction

The evolution of the economical and environmental context (reduction of pesticides use, increase of energetic cost and climate change) requires an adaptation and/or optimization of the winegrower's practices to continue to elaborate competitive and qualitative wines.

Most of the 'terroir' studies only characterize the environmental factors (Vaudour, 2003), nevertheless they interact with practices (including choice of plant material) (Tesic et al., 2007; Thiollet-Scholtus et al., 2008).

→ Our objective is to propose a **systemic modeling approach to predict the berry composition and the wine style according to environmental factors** (soil & climate) and **viticultural practices**, at the plot and vintage scales.

The model building will be coupled with an evaluation of economic costs and environmental impacts in order to build **a complete decision aid tool**.

☞ ***We focus here on the systemic modeling design.***

Method: ergonomic variables and original aggregation

1. Identification of variables influencing berry composition and their interactions.

The design of the model is based on previously published data and statistical analyses of i. survey of practices and environmental factors databases and ii. data from experimental plots.

☞ the **input variables** of the model have to be very accessible data so we use existing databases and/or variables easily measurable on the plot.

Variables are **aggregated** combining *quantitative* (equations) and *qualitative methods* (decision rules) to build easily understandable indicators that allow to predict the fruit composition.

2. Validation of the aggregations of the variables and the behavior of the model.

i- **Sensitivity analyses** of indicator variables are used to evaluate the weight of each variable in the indicator building.

ii- Indicator output classes are **crossed with measured data classes** (Bockstaller and Girardin, 2003).

↳ The two steps are repeated until the model gives satisfactory predictions of fruit composition .

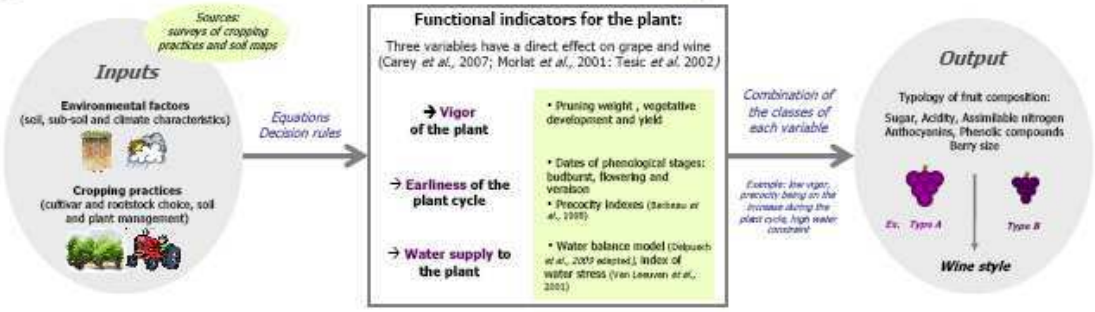
3. End-use validation with Research Development Extension (RDE) agents and technicians of wine cooperatives.

☞ to validate the usefulness of the global model and to ensure it brings a decision aid to the farmer, the RDE agents and technicians.

Result: a global conceptual model

Primary indicators:
Prediction, according to environmental factors and practices, of the 3 major variables named 'functional indicators for the plant' that influence berry composition

Global indicator:
Prediction of berry composition according to the 3 functional indicators



Discussion and Conclusion

▸ The **functioning variables of the plant** account for the interactions within the 'vine system' → they are **measurable and can be predicted**. Focus on these variables enable us to develop an original method based on **a systemic approach useful for farmers**.

▸ This project will allow a conceptual and methodological advance in the studies of the impact of environmental factors and cropping practices on berry composition and wine style which can be applied to others agricultural productions.

New horizons

▸ Coupling with economic and environmental costs evaluation

▸ Design of the decision aid tool (software) based on the model

Acknowledgements: We thank the 'INRA-SAD' department and 'Pays de la Loire Region' for their financial support and 'UMT Vinitera' teams (Angers), 'UMR Analyse des systèmes et biométrie' (Montpellier) and 'La cave des vignerons de Saumur' for scientific and technical supports.

Bibliography

Barbeau, G. *et al.* (1998). Bulletin de l'OIV, 71 (805/806): 247-262.
Bockstaller C. and Girardin P. (2003), Agricultural Systems, 76: 639-653.
Carey, V. *et al.* (2007). Acta Horticulturae, 754.
Delpuech, X. *et al.* (2009). VI International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops, 2-6 nov. 2009.
Morlat, R. *et al.* (2001). Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin. Hors-série : 21-33.
Tesic, D. *et al.* (2002). Australian Journal of Grape and Wine Research 8(1): 15-26.
Thiollet-Scholtus, M., Coulon, C. and Morlat, R. (2008). OIV congress, Verona, Italie,16-20 juin 2008.
Tesic, D. *et al.* (2007). American Journal of Enology and Viticulture 58 (1): 15-25.
Van Leeuwen, C. *et al.* (2001). Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin, 35 (4): 195-205
Vaudour, E. (2003). Les terroirs viticoles. Définitions, caractérisation et protection., Dunod, 293 pp.

Agro 2010 Congress, August 29 to Septembre 03, 2010 (Montpellier, France)

Seminar 'Innovation and decision aid in agriculture: which role of research and which partnerships'

DESIGN OF AN INDICATOR OF VINE VIGOR POTENTIAL CONFERRED BY SOIL (VIPOS), USING A FUZZY EXPERT SYSTEM

Coulon Cécile [1], Rioux Dominique [2], Guillaume Serge [3], Charnomordic Brigitte [4], Gérard Barbeau [1], Thiollet-Scholtus Marie[1]

[1] INRA UE1117, UMT Vinitera, 49071 Beaucouzé, France
cecile.coulon@angers.inra.fr

[2] Cellule Terroirs Viticoles, UMT Vinitera, 49071 Beaucouzé, France

[3] Cemagref, UMR ITAP, 34196 Montpellier, France

[4] INRA Supagro, UMR MISTEA, 34060 Montpellier, France

ABSTRACT

Winegrowers must adapt more and more their viticultural practices in order to evolve toward a sustainable viticulture, to be competitive and to improve both the production methods and the quality and typicalness of wines. In this context, 'Terroir' studies in Loire Valley vineyards have allowed to build decision aid maps that can be used directly by growers to adjust their practices. We focus here on the vigor potential conferred by soil (VIPOS) that especially allows adapting the choice of the rootstock. An algorithm had previously been proposed by Morlat (2001) to estimate VIPOS according to three main influencing variables: water holding capacity of the soil, gravel percentage on the soil profile and parent rock hardness. Nevertheless, the VIPOS estimation, based on this algorithm, had to be completed by expertise. The objective of the paper is to present a new method to estimate VIPOS using a fuzzy expert system that allows having an automatically continuous estimation.

KEYWORD

Vine vigor – Fuzzy expert system – Soil characteristics – Decision aid maps

INTRODUCTION

Vine comportment is influenced by different soil factors. Main effects concern vine water supply, earliness and vigor potentials conferred by the soil (Jackson and Lombard, 1993; Trought *et al.*, 2008). In the characterization of viticultural soils with mapping, these variables are not directly measured but can be estimated by different mathematical algorithms that were developed for the cartography of Basic Terroir Units (BTUs) (Morlat *et al.*, 2001). The knowledge of these ecophysiological variables can be used to build decision aid maps to help winegrowers to better adjust their agro-viticultural practices to each BTU (rootstock and variety choice, suggested agro-viticultural practices). The rootstock type (Koundouras *et al.*, 2008) and the soil management practices (Barbeau *et al.*, 2006) can also have a significant influence on the vigor of a plot. In a 'low vigor' vineyard, vines have thin and short shoots with few and small leaves. Conversely, a 'high vigor' vineyard tends to induce a rapid shoot growth in spring which may be extended late into the growing season, often after veraison. Since the balance between vegetative growth and reproductive phase influences berry composition, this interaction must be controlled (Carbonneau *et al.*, 2007).

The algorithm, previously proposed by Morlat (2001) to estimate the vigor potential conferred by soil (VIPOS) for each BTU, was calculated from data coming from soil auger observations and soil samples. It was estimated from three variables: 1. Water holding

capacity (WHC); 2. Gravel percentage on soil profile (GP), and 3. Parent rock hardness (PAROH). Its estimation was based on an equation and the continuous variables were partitioned into three crisp classes. Most of the time, VIPOS estimation needed to be reevaluated by expertise because of the sharp transition between classes. The objective of the paper is to present a new method to eliminate the problem of the sharp transition due to class bounds. We propose an original method combining statistical analyses and expert evaluation to estimate the VIPOS using a fuzzy inference system. The fuzzy inference system allows i) translating in simple words the relations between the variables and ii) a progressive transition between two classes. Furthermore, this method, despite using uncertain data, provides satisfactory results.

MATERIALS AND METHODS

First algorithm to calculate VIPOS: It was based on an equation where weights were attributed to each variable and class of variables, according to their influence on the vigor potential conferred by soil. A linguistic term was attributed according to the weighted sum of the previous ratings (Figure 1). Gravel Percentage on soil profile (GP) and Water Holding Capacity (WHC) were continuous variables. GP was visually evaluated during soil mapping and depended on auger observations. WHC was a composite variable determined from soil water content at field capacity and wilting point, soil texture, rooting depth and bulk density (Goulet *et al.*, 2004). These two variables were partitioned into three crisp classes by expertise. PAROH was determined according to the parent-rock and deep horizon types (Tab. 1)

Variable	Coefficient	Class	Rating
Gravel percentage on soil profile (GP)	1	> 40% 20 à 40% <20%	1 2 3
Parent rock hardness (PAROH)	1	Hard Soft Crumbly	1 2 3
Water holding capacity (WHC)	2	[0 to 50[mm [50 to 100[mm ≥ 100 mm	1 2 3
VIPOS		**[4 - 7[[7 - 10[[10 - 12[**	**Low Medium High**

Figure 1 : First algorithm proposed by Morlat (2001) to evaluate the vine vigor potential conferred by soil

Table 1: PAROH classes determined according to parent-rock and horizon deep types, pedological nomenclature according to (Baize *et al.*, 2008).

PAROH classes	Pedological nomenclature	Description	Examples
Hard	R	Hard rock formation	Rhyolite
Soft	Rt and C	Soft rock formation and C horizon, altered rock by weathering	Chalk, friable rock
Crumbly	Rm and S	Incoherent rock, structural horizon and alterite formation	Sand, bottomland

Nevertheless, final VIPOS estimation had to be reevaluated by expertise because of the sharp transition between classes. Thus, we wanted to improve the VIPOS evaluation using a new method.

New method to enhance VIPOS estimation using a fuzzy expert system: Fuzzy set theory allows to define the "degree of membership" of an element in a set by means of a membership function. For classical or "crisp" sets, the membership function only takes two values: 0 (non-membership) and 1 (membership). In fuzzy sets the membership function can take any value from the interval [0,1]. The value 0 represents complete non-membership, the value 1 represents complete membership, and values in between are used to represent partial membership (Van der Werf, H. M. G. and Zimmer C., 1998). Firstly, for each input variables (WHC, GP and PAROH) we defined two fuzzy sets: low/high to GP and WHC variables and

Hard/Crumbly to PAROH. Variables were partitioned thanks to k-means statistical analysis or "expert" knowledge of the working-team who did the auger observations. According to input data distribution, k-means analysis generates clusters as distinct as possible. That way, each value of a variable can be characterized by a membership function to the fuzzy sets. The output VIPOS is a continuous variable between 1 (low vigor) and 3 (high vigor).

Secondly, the first algorithm was translated into fuzzy decision rules that consisted of three premises parts (*if*…) linked by *and*, followed by a conclusion (*then*…). Relationships between inputs (WHC, GP and PAROH) and the output (VIPOS) were designed in a fuzzy rule set. We used Sugeno's inference method: a typical rule in a Sugeno fuzzy model has the form *'If input 1 = x and input 2 = y then Output is z = ax+by+c'*. Each rule uses the combination of the input membership values as weighting factors to determine its matching degree with a given sample. The final inferred VIPOS is the weighted sum of all the rule conclusions.

Finally, having thus defined the membership functions and formulated the decision rules, we calculated values of VIPOS. An analysis of sensitivity was conducted to illustrate the system behavior and to validated by expertise the new original method to estimate VIPOS.

Data set and software used: Data came from to the soil characterization of 3847 plots located in the Loire Valley vineyard, France. Statistical descriptive analyses of the dataset were done using the R.2.10.1 software. The fuzzy expert system was implemented through the use of the software program Fispro 3.2 (Guillaume *et al.*, 2002).

RESULTS AND DISCUSSION

Characterization of the three input variables: WHC varied between 10mm and 459mm, GP between 0% and 66% and the three types of parent rock hardness were represented (cf. Table 2). The training data variability allowed this indicator to be used in a wide range of situations.

Table 2: Statistical descriptive analysis of the three input variables: Water Holding Capacity (WHC), Gravel percentage (GP) and Parent Rock Hardness (PAROH).

	WHC: Water Holding Capacity (mm)	GP: Gravel percentage (%)
Minimum	10	0
1st Quartile	65	6
Median	113	11
Mean	124	15
3rd Quartile	154	19
Maximum	459	66

	PAROH: Parent Rock Hardness (% of each type)
Crumbly	34%
Soft	22%
Hard	44%

Selection of the fuzzy partitions for the three input variables: It was difficult to determine the Gravel percentage breakpoints by expertise so we determined the limits of partitions (10% and 40%) thanks to a k-means analysis. There were only three values of parent rock hardness type so this variable was partitioned as a regular grid from 1 'crumbly' to 3 'hard', the 'soft' class was equivalent to the intersection point and therefore was built by interpolation between classes 1 and 3. The two breakpoints 50 and 100mm of water holding capacity were fixed according to expertise. Zufferey and Murisier observe that plots with a WHC below 100mm are sensitive to water stress (Zufferey and Murisier, 2006). The selected fuzzy partitions for each variable are presented on Figure 2.

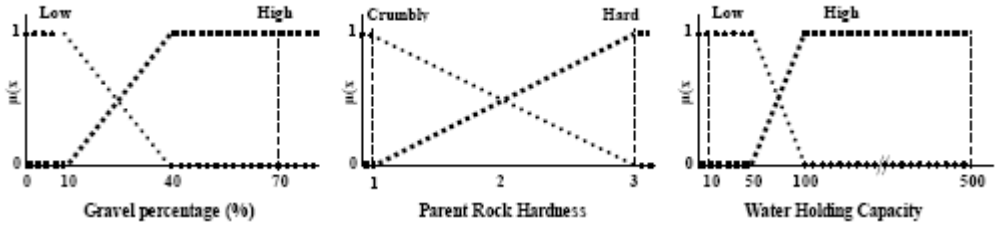


Figure 2: Selected fuzzy partitions for Water Holding Capacity (WHC), Gravel percentage (GP) and Parent Rock Hardness (PAROH) variables, $\mu_{(x)}$ normalised membership degree.

Building a set of decision rules: The set of decision rules covered all the situations that may occurred; that corresponded to eight decision rules (Tab. 3). The weight attributed to each variable in the first algorithm according to their influence on VIPOS was preserved. To determine the output value, we attributed a score of 1 when the output class of the variable ended up to a low vigor and a score of 2 when it ended up with a high vigor, and a weighting factor (2) was attributed to WHC. The scale of output values from 4 to 8 was converted back to a scale from 1 (low vigor) to 3 (high vigor) easier to understand (these building steps are indicated in grey on Tab. 3). The weighting from membership degrees were laid on this last scale.

Table 3: Decision rules for estimation of Vine Vigor Potential conferred by soil (VIPOS) from Gravel Percentage (GP), Parent Rock Hardness (PAROH) and Water Holding Capacity (WHC) (building steps are indicated in grey).

If Gravel percentage on soil profile (GP)	*and* Parent rock hardness (PAROH)	*and* Water holding capacity (WHC)	*then* VIPOS value
Low (2)	Hard (1)	Low (2x1=2)	2+1+2=5 ⇨ **1,5**
Low (2)	Hard (1)	High (2x2=4)	2+1+4=7 ⇨ **2,5**
Low (2)	Crumbly (2)	Low (2x1=2)	2+2+2=6 ⇨ **2**
Low (2)	Crumbly (2)	High (2x2=4)	2+2+4=8 ⇨ **3**
High (1)	Hard (1)	Low (2x1=2)	1+1+2=4 ⇨**1**
High (1)	Hard (1)	High (2x2=4)	1+1+4=6 ⇨ **2**
High (1)	Crumbly (2)	Low (2x1=2)	1+2+2=5 ⇨ **1,5**
High (1)	Crumbly (2)	High (2x2=4)	1+2+4=7 ⇨ **2,5**

Sensitivity tests and validation: In order to illustrate the system behavior and to validate the new method, a sensitivity analysis of the VIPOS indicator to variations in the values of its three input variables is presented on Figure 3.

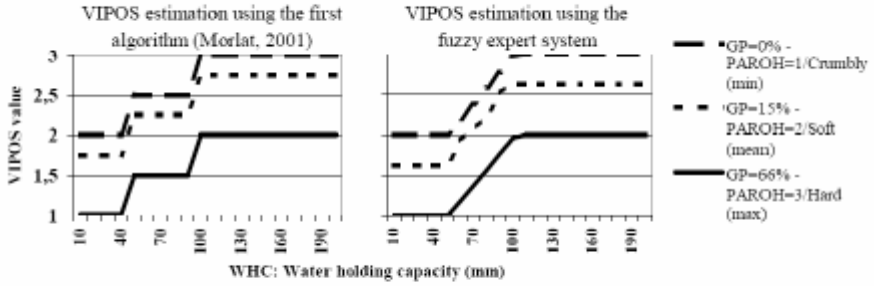


Figure 3: Sensitivity analysis of VIPOS estimation to variations of the input variable WHC (Water Holding Capacity), comparing the former algorithm and the new method. WHC varied from 10 to 200mm while the two other input variables are kept at the minimum, mean or maximum value.

The new method allowed having a continuous estimation of vine vigor conferred by soil and avoided a reclassification through expertise. An example of VIPOS estimation is presented on Table 4. Plot 1 and plot 2 had the same type of parent rock and the same percentage of gravel on the soil profile but had a difference of 40mm water holding capacity between them. In spite of different water holding capacities, using the former algorithm, plot 1 and plot 2 had the same VIPOS value, and need to be reclassified together by hand, with the 1,5 value reset to 2, to better correspond to the reality. With the latter algorithm (fuzzy expert system), the inferred VIPOS values of plot 1 and 2 were respectively 1,1 and 1,9, so the new method avoided the reclassification through expertise. All of the VIPOS estimations can be now completely automatic.

Table 4: Example of VIPOS estimation: comparison between the former algorithm and the latter one, which uses the fuzzy expert system.

			VIPOS estimation using the **former algorithm**	VIPOS estimation using the **fuzzy expert system**
Plot 1	GP=66% - PAROH=3/Hard	WHC=55mm	1,5	1,1
Plot 2		WHC=95mm	1,5	1,9
Plot 3		WHC=100mm	2	2

Two types of validation can be considered: a 'design validation' that evaluates the scientific quality of the indicator construction or design and an 'output validation' that checks the accuracy of the information supplied by the indicator output (Bockstaller and Girardin, 2003). The same authors highlight that indicators are used to assess complex processes that often do not have quantitative equivalents; the estimated indicator can be confronted to measured data but also submitted to expert evaluation. The vine vigor conferred by soil was not measurable, so we choose the expert evaluation. VIPOS indicator will be linked with rootstock, variety and viticultural practices to accurately predict the final vigor of a vine plot. This final vigor is measurable thanks to the pruning weights, for example; once this is done, we will perform a more complete validation.

CONCLUSIONS

This step by step approach using a fuzzy expert system is a very transparent method, because each step can be controlled. The method allows having a continuous estimation of vine vigor conferred by soil and avoids a reclassification through expertise. It also permits to represent the expert knowledge, linking expertise and data mining. On one hand, this approach will be extended to the vine earliness potential conferred by soil and on the other hand the VIPOS indicator will be linked with rootstock, variety and viticultural practices to accurately predict the final vigor of a vine plot.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank the 'INRA-SAD' department and 'Pays de la Loire Region' for their financial support. We are also grateful to Vincent Courtin and René Morlat for valuable comments on this work.

BIBLIOGRAPHY

Baize, D., Girard M.-C., Association française pour l'étude du sol (AFES), 2008. Référentiel pédologique – 2008. Quae, collection Savoir faire. 1ère édition, 02/03/2009. 406 p.

Barbeau G., Goulet E., Ramillon D., Rioux D., Blin A., Marsault J. and Panneau J.-P., 2006. Effets de l'interaction Porte-Greffe/Enherbement sur la réponse agronomique de la vigne (Vitis vinifera L cvs. Cabernet Franc et Chenin). *Progres Agricole et Viticole* 123(4): 80-86.

Bockstaller C. and Girardin P., 2003. How to validate environmental indicators ? *Agricultural Systems* 76(2): 639-653.

Carbonneau A., Deloire A. and Jaillard B., 2007. La vigne. Physiologie, terroir, culture. Dunod. 441p.

Goulet E., Morlat R., Rioux D. and Cesbron S., 2004. A calculation method of available soil water content: application to viticultural terroirs mapping of the Loire valley. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 38(4): 231-235.

Guillaume S., Charnomordic B. and Lablee J.-L., 2002. Fispro: An open source portable software for fuzzy inference systems http://www.inra.fr/internet/Departements/MIA/M/fispro/. Retrieved December 2009.

van der Werf, H. M. G. and Zimmer C., 1998. An indicator of pesticide environemental impact based on a fuzzy expert system. Chemosphere 36(10): 2225-2249.

Jackson D. I. and Lombard P. B., 1993. Environmental and management practices affecting grape Composition and wine Quality - A Review. *American Journal of Enology and Viticulture* 44(4): 409-430.

Koundouras S., Tsialtas I. T., Zioziou E. and Nikolaou N., 2008. Rootstock effects on the adaptive strategies of grapevine (Vitis vinifera L. cv. Cabernet-Sauvignon) under contrasting water status: leaf physiological and structural responses. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 128(1/2): 86-96.

Morlat R. Guibault P., Rioux D., Asselin C. and Barbeau G., 2001. Terroirs Viticoles : étude et valorisation. Oenoplurimedia, Avenir Oenologie.

Trought M. C. T., Dixon R., Mills T., Greven M., Agnew R., Mauk J. L. and Praat J. P., 2008. The impact of differences in soil texture within a vineyard on vine vigour, vine earliness and juice composition. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 42(2): 67-72.

Zufferey V. and Murisier F., 2006. Terroirs viticoles vaudois et alimentation hydrique de la vigne. *Revue Suisse de Viticulture, Arboriculture et Horticulture* 38(5): 283-287.

Design of an indicator of vine VIgor POtential conferred by Soil (VIPOS) using a fuzzy expert system

Coulon Cécile [1], Rioux Dominique [2], Guillaume Serge [3], Charnomordic Brigitte [4], Barbeau Gérard [1] , Thiollet-Scholtus Marie [1]

(1) INRA-UE1117, UMT Vinitera, 42 rue Georges Morel, 49071 Beaucouzé, France
(2) Cellule Terroirs Viticoles, UMT Vinitera, 42 rue Georges Morel, 49071 Beaucouzé, France
(3) Cemagref, UMR Information et technologies pour les Agroprocédés, 362 rue Jean-François Breton, 34196 Montpellier Cedex 5, France
(4) INRA-Supagro, UMR Analyse des Systèmes et Biométrie, 2 place Pierre Viala, 34060 Montpellier, France

Vinitera

Winegrowers must more and more adapt the agro-viticultural practices in order to be competitive and to improve both the production methods and the products.

➡ Decision aid tools based on the cartography of Basic Terroir Units play a major role in this process.

One map concerns the estimation of the vigor potential conferred by soil (VIPOS).

An algorithm (Morlat, 2001) estimates VIPOS according to three main influential variables: water holding capacity of the soil, gravel percentage on the soil profile and parent rock hardness. Nevertheless, it had to be completed by expertise.

☝ We present a new method to estimate VIPOS using a fuzzy expert system that automatically gives a continuous estimation.

Material and methods

Former algorithm

➡ An equation where weights were assigned to each variable and class of variables according to their influence on the vigor potential conferred by soil (Morlat, 2001):

Variable	Coefficient	Class	Rating
Gravel percentage on soil profile (GP)	1	> 40% 20 à 40% < 20%	1 2 3
Parent rock hardness (PAROH)	1	Hard Soft Crumbly	1 2 3
Water holding capacity (WHC)	2	[0 to 50[mm [50 to 100[mm > 100 mm	1 2 3
VIPOS		[4 - 7[[7 - 10[[10 - 12]	Low Medium High

☝ sharp transition between classes

Expert system and fuzzy logic method

➡ A fuzzy set is defined by its membership function:
a point belongs to a fuzzy set with a degree of membership between 0 and 1

☝ the fuzzy logic allows a gradual transition between classes

❶ The values of input variables are translated into 2 linguistic terms corresponding to 2 fuzzy sets : low/high (for GP and WHC), crumbly/hard (for PAROH) with their membership degrees to the 2 fuzzy sets. The membership functions are determined using statistical analyses (k-means) on a database, expertise and literature. Data come from the soil characterization of 3847 plots located throughout the Loire Valley.

❷ The former algorithm was converted into a set of decision rules using the linguistic terms. The conclusion of the fuzzy rules is a value for the VIPOS indicator between 1 and 3.

The fuzzy expert system was implemented through the use of the software program FisPro 3.2 (Guillaume *et al.*, 2002).

Results and discussion

Selected fuzzy partitions for the three input variables

10% and 40% limits were determined thanks to a *k-means* analysis on the database

Regular grid, 'soft' class was built by interpolation between classes 1 and 3

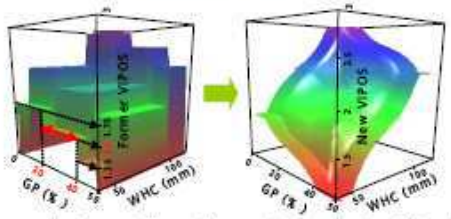
50mm and 100mm limits were fixed according to *expertise*

Set of fuzzy decision rules

If Gravel percentage on soil profile (GP)	*and* Parent rock hardness (PAROH)	*and* Water holding capacity (WHC)	*then* VIPOS value
Low	Hard	Low	1,5
Low	Hard	High	2,5
Low	Crumbly	Low	2
Low	Crumbly	High	3
High	Hard	Low	1
High	Hard	High	2
High	Crumbly	Low	1,5
High	Crumbly	High	2,5

Each combination of fuzzy sets corresponds to a VIPOS value, degrees of membership yield a continuous estimation between these values.

Sensitivity analysis



The new method automatically provides a continuous estimation of vine vigor conferred by soil and avoids a reclassification through expertise.

VIPOS map

VIPOS values can be represented on a map with a color gradient.

☝ On the same area, a plot with a low vigor potential and another with a high vigor potential can be found!

The rootstock type (Koundouras *et al.*) and the soil management practices (Barbeau *et al., 2006*) can have a significant influence on the vigor of a plot.

➡ *This type of map can help the winegrowers to best adapt their practices in each plot.*

Bibliography:
- Barbeau G. *et al.*, (2006). Progrès Agricole et Viticole 123(6): 60-69.
- Guillaume S. *et al.*, (2002) http://www.inra.fr/internet/Departements/MIA/M/fispro/. Retrieved December 2003.
- Koundouras S. *et al.*, (2006). Agriculture, Ecosystems & Environment 115(1/2): 86-96.
- Morlat R. *et al.*, (2001). Oenoplurimedia, Aveiro Oenologia. 118pp.

New horizons

- This approach will be extended to the vine earliness potential conferred by soil.
- The VIPOS indicator will be linked with rootstock, variety and viticultural practices to predict the final vigor of a vine plot.

Acknowledgements: We thank the 'INRA-SAD' department and 'Pays de la Loire Region' for their financial support. We are also grateful to Vincent Courtin and René Morlat for valuable comments on this work.

VIII International Terroir Congress, June 14th-18th, Soave (Italy)
Session 'New methods and technologies to describe the environment'

cecile.coulon@angers.inra.fr

INRA

Thesis title: Systemic approach of vine functioning characterization from the assessment of joint effects of environmental factors and cultural practices, to predict wine types.

Key-words: Modelling, vigor, precocity, water supply, fuzzy inference systems, sensory analysis, vineyard plot

Winegrowers must adapt their viticultural practices taking into consideration new environmental regulations and changing climate. Modelling the viticultural production system may provide guidance and supporting to winegrowers and decision makers. It will furthermore permit researchers and engineers to test prospective scenarios. Modelling must take into account environmental and human factors as well as the quality of products. The objective of the thesis is to propose and test a methodological approach.

We designed a conceptual representation of the joint effects of soil, subsoil, landscape and cultural practices on vine functioning. Variables are of different nature and some of them uncertain. We chose appropriate mathematical methods to aggregate variables. These aggregations are based on expert knowledge and automatic learning from data. The joint effects were connected to 'grape/wine' product types that were previously characterized by winegrowers and advisor agents. Modelling and application of the conceptual representation use data from winegrower's plots.

Our concept applied to studied plots, allowed showing that it was possible to characterize, in a simple and operational way, the global vine functioning and link it to 'grape/wine' product types. Results validated a two step methodology at the plot level: firstly, characterization of variables evaluating vegetative development and precocity; secondly, characterization of water supply conditions. Vine functioning variables can be predicted. Water supply conditions are predicted according to existing models. Vine development variables can be predicted. Our method highlighted interactions between environmental factors and cultural practices in the prediction of vine vigor. When all of the factors influencing vine development are considered, our results show that a simple model based on direct relationships, coming from expert knowledge and literature, is not efficient enough to predict vine functioning variables. Our modelling method takes into account all the interactions between the variables.

Results of this study will aid winegrowers to optimize the choice of their cultural practices, depending on environmental factors and type of wine expected. This method can be applied to protected designation of origin, protected geographical indication and table wines areas.

Titre de la thèse : Méthode de caractérisation systémique du fonctionnement de la vigne à partir de l'évaluation des effets combinés du milieu et des pratiques culturales pour prévoir les types de vins.

Mots-clés : Modélisation, vigueur, précocité, alimentation hydrique, systèmes d'inférence floue, analyse sensorielle, parcelle viticole

Les viticulteurs doivent adapter leurs pratiques culturales en prenant en compte l'évolution du contexte réglementaire et climatique. La modélisation du système de production viticole peut les y aider. Elle permet la construction d'outils d'aide à la décision pour les viticulteurs et les techniciens de la filière viti-vinicole. Pour les chercheurs et ingénieurs, elle sert aussi de support pour tester des scénarios prospectifs dans le cadre de ce contexte changeant. Dans une approche systémique, la modélisation doit intégrer les facteurs du milieu, les facteurs humains et la qualité des produits, ce qui constitue un enjeu important. Pour répondre à ce dernier, cette thèse a pour objectif de proposer une démarche méthodologique et de la tester.

Nous avons élaboré le concept 'd'itinéraire de fonctionnement' qui permet de modéliser le fonctionnement de la vigne dans son milieu, en fonction des effets combinés du sol, du sous-sol, de l'environnement paysager et des pratiques culturales. Ces variables étant de nature différente, et présentant une certaine part d'incertitude, nous avons choisi des méthodes mathématiques appropriées pour les agréger. Ces agrégations se basent sur de la connaissance experte et de l'extraction de connaissance venant des bases de données. Après une caractérisation, les itinéraires de fonctionnement ont été mis en relation avec les types de produit raisin/vin identifiés par des viticulteurs et techniciens. La modélisation et l'application du concept d'itinéraire de fonctionnement s'appuient sur des données recueillies sur des parcelles du vignoble.

L'application du concept d'itinéraire de fonctionnement de la vigne, sur des parcelles d'étude, a permis de montrer qu'il était possible de caractériser, de manière simple et opérationnelle, le fonctionnement de la vigne dans son ensemble et de le relier à des types de produit raisin/vin. Les résultats valident une application en deux étapes : dans un premier temps, la caractérisation de variables évaluant le niveau de développement végétatif et la précocité des parcelles, et dans un second temps, l'évaluation de l'impact des conditions d'alimentation hydrique. Les variables de fonctionnement de la vigne peuvent être prédites. Les conditions d'alimentation hydrique le sont en fonction de modèles existants. La méthode proposée pour évaluer la vigueur de la vigne a mis en évidence la présence d'interactions entre les facteurs du milieu et les pratiques culturales. Nos résultats montrent, que lorsque l'ensemble des facteurs sont pris en compte, un modèle basé uniquement sur une connaissance experte et des relations directes issues de la bibliographie ne peut pas être performant pour prédire les variables de fonctionnement. La méthode de modélisation que nous proposons intègre, en plus, l'effet des interactions entre les variables

Les résultats de cette étude permettront aux viticulteurs de choisir les pratiques culturales les mieux adaptées aux facteurs du milieu et au type de vin souhaité. Cette méthode est applicable aussi bien pour les zones d'appellation que pour les zones de production de vins génériques.

Titre de la thèse : Méthode de caractérisation systémique du fonctionnement de la vigne à partir de l'évaluation des effets combinés du milieu et des pratiques culturales pour prévoir les types de vins.

Mots-clés : Modélisation, vigueur, précocité, alimentation hydrique, systèmes d'inférence floue, analyse sensorielle, parcelle viticole

Les viticulteurs doivent adapter leurs pratiques culturales en prenant en compte l'évolution du contexte réglementaire et climatique. La modélisation du système de production viticole peut les y aider. Elle permet la construction d'outils d'aide à la décision pour les viticulteurs et les techniciens de la filière viti-vinicole. Pour les chercheurs et ingénieurs, elle sert aussi de support pour tester des scénarios prospectifs dans le cadre de ce contexte changeant. Dans une approche systémique, la modélisation doit intégrer les facteurs du milieu, les facteurs humains et la qualité des produits, ce qui constitue un enjeu important. Pour répondre à ce dernier, cette thèse a pour objectif de proposer une démarche méthodologique et de la tester.

Nous avons élaboré le concept 'd'itinéraire de fonctionnement' qui permet de modéliser le fonctionnement de la vigne dans son milieu, en fonction des effets combinés du sol, du sous-sol, de l'environnement paysager et des pratiques culturales. Ces variables étant de nature différente, et présentant une certaine part d'incertitude, nous avons choisi des méthodes mathématiques appropriées pour les agréger. Ces agrégations se basent sur de la connaissance experte et de l'extraction de connaissance venant des bases de données. Après une caractérisation, les itinéraires de fonctionnement ont été mis en relation avec les types de produit raisin/vin identifiés par des viticulteurs et techniciens. La modélisation et l'application du concept d'itinéraire de fonctionnement s'appuient sur des données recueillies sur des parcelles du vignoble.

L'application du concept d'itinéraire de fonctionnement de la vigne, sur des parcelles d'étude, a permis de montrer qu'il était possible de caractériser, de manière simple et opérationnelle, le fonctionnement de la vigne dans son ensemble et de le relier à des types de produit raisin/vin. Les résultats valident une application en deux étapes : dans un premier temps, la caractérisation de variables évaluant le niveau de développement végétatif et la précocité des parcelles, et dans un second temps, l'évaluation de l'impact des conditions d'alimentation hydrique. Les variables de fonctionnement de la vigne peuvent être prédites. Les conditions d'alimentation hydrique le sont en fonction de modèles existants. La méthode proposée pour évaluer la vigueur de la vigne a mis en évidence la présence d'interactions entre les facteurs du milieu et les pratiques culturales. Nos résultats montrent, que lorsque l'ensemble des facteurs sont pris en compte, un modèle basé uniquement sur une connaissance experte et des relations directes issues de la bibliographie ne peut pas être performant pour prédire les variables de fonctionnement. La méthode de modélisation que nous proposons intègre, en plus, l'effet des interactions entre les variables

Les résultats de cette étude permettront aux viticulteurs de choisir les pratiques culturales les mieux adaptées aux facteurs du milieu et au type de vin souhaité. Cette méthode est applicable aussi bien pour les zones d'appellation que pour les zones de production de vins génériques.