



HAL
open science

Développement conceptuel et mathématique d'un modèle de rendement de la vigne intégrant les contraintes biotiques et abiotiques

Amira Najjar

► **To cite this version:**

Amira Najjar. Développement conceptuel et mathématique d'un modèle de rendement de la vigne intégrant les contraintes biotiques et abiotiques. Agronomie. 2019. hal-04051712

HAL Id: hal-04051712

<https://hal.inrae.fr/hal-04051712>

Submitted on 30 Mar 2023

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.

Public Domain

Année universitaire : 2018 - 2019

Spécialité : Ingénieur Agronome

Spécialisation / Parcours :

Sciences et Ingénierie du Végétal /
Agrosystèmes : Conception et Evaluation

Mémoire de fin d'études

d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Développement conceptuel et mathématique d'un modèle de rendement de la vigne intégrant les contraintes biotiques et abiotiques

Par : Amira NAJJAR



Soutenu à Rennes le 11/09/2019

Devant le jury composé de :

Président : Matthieu CAROF

Rapporteur : Christine BISSUEL

Maître de stage : Nathalie SMITS et Anne PELLEGRINO

Enseignant référent : Edith LECADRE

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

Dédicace

Du profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers.

A mes héros préférés, à la mère la plus tendre et au père le plus fort

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien-être. Que ce modeste travail soit le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez. Que Dieu, vous accorde santé, bonheur et longue vie et fasse en sorte que jamais je ne vous déçoive. Je vous remercie pour tout...

A mes amies éternelles, aux sœurs les plus adorables

En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.

A ma meilleure adversaire au « Chkobba », à la grand-mère la plus spéciale

Qui m'a toujours accompagnée par ses prières, sa douceur, puisse Dieu lui prêter longue vie et beaucoup de santé et de bonheur.

A l'âme de « Baba Sidi », le grand-père le plus généreux

Aux âmes de mes grands-parents paternels,

J'aurais tant aimé que vous soyez présents pour témoigner la délibération de ce travail.

Aux uniques « Habibety », à mes chères copines de la classe « 6^{ème} année »

En souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

A toute personne que j'ai rencontrée durant les 6 mois de stage

Merci pour tout. Merci de ne pas me laisser seule. Merci pour la belle ambiance.

Une spéciale dédicace à tous mes professeurs et amis de l'Institut Nationale Agronomique de Tunisie.

Un petit mot de reconnaissance à Madame Basma langliz et Madame Amina Abidi... Mes maitresses de la 1ère année primaire !

شكراً !!



Remerciement

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon stage et qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce rapport.

Tout d'abord, j'adresse mes remerciements à Monsieur Christian GARY, de m'avoir accueillie au sein de son équipe de recherche de l'UMR SYSTEM à l'INRA de Montpellier.

Je tiens à remercier vivement mes maitres de stage, Nathalie SMITS, Anne PELLIGRINO pour disponibilité, leurs conseils et leurs réponses à toutes mes interrogations pour m'améliorer. C'est grâce à leur confiance j'ai pu bien accomplir mon travail.

Je remercie également Aurélie METAY, pour son accueil, son encouragement et son soutien surtout au début de mon stage.

Je remercie très chaleureusement Sylvain VRIGNON, Luciana WILHELM et Romain LEPORATTI de l'UMR LEPSE pour leur aide précieuse, « efficiency » et dévouement lors des manip au laboratoire.

Je ne saurais terminer cette liste de remerciements sans évoquer le personnel et stagiaires des deux unités, pour leur gentillesse et ambiance.

Amira

Août 2019



Liste des abréviations

Rg : Rayonnement global

PAR : Photosynthetically Active Radiation ; Rayonnement photosynthétiquement actif

RUE : Radiation Use Efficiency ; C'est l'efficacité de l'utilisation du rayonnement

DVS : Stade de développement

k : coefficient d'extinction

AIDB : Assessment Indicator of Damage in grape Bunches ; C'est un indicateur de sévérité des bioagresseurs sur vigne

iBM : biomasse du compartiment i

CCPi : Coefficient de répartition de carbone vers l'organe i

CCAi : Coefficient de répartition de carbone vers l'organe i

rdt : rendement

C : carbone

N : azote

Ymax : rendement maximal

YACT : rendement réel

Yatt : rendement atteignable

Table des matières

Introduction	1
I. Etat de l'art et problématique.....	2
A. Ecophysiologie de la vigne	2
1. Phénologie et cycle de développement	2
2. Physiologie de la croissance.....	2
3. Accumulation des réserves.....	3
4. Elaboration du rendement	3
B. Facteurs limitants du rendement : contraintes abiotiques et biotiques	4
1. Contraintes abiotiques	4
a. Contraintes hydrique et azotée	4
2. Contraintes biotiques	4
Les principales maladies de la vigne : oïdium et mildiou.....	5
C. Les dépérissements de la vigne et leurs causes	5
1. Dépérissement de la vigne	5
2. Les causes du dépérissement.....	5
D. Analyse comparative de différents modèles de croissance de la vigne	6
1. Modèle de croissance de <i>V. Vinifera</i> L.	6
2. STICS vigne.....	6
3. GreenLab vigne	7
4. GENECROP.....	7
5. GrapePest	7
E. Problématique du stage et démarche	8
1. Objectifs	8
2. Démarche.....	10
II. Matériel et méthodes	10
A. Dispositifs expérimentaux	10
B. Description du modèle GrapePest initial	12
C. Démarche de conceptualisation du modèle.....	12
D. Analyse statistique et estimation des paramètres	12
III. Résultats	13
A. Conceptualisation du nouveau modèle pour la simulation des pertes de rendement.....	13
1. Structure générale.....	13
2. Hypothèses structurantes du modèle	14
B. Développement mathématique du nouveau modèle pour la simulation des pertes de rendement	

1. Choix des formalismes	15
IV. Discussion.....	19
A. Discussion des méthodes	19
1. Démarche de conceptualisation et modèle conceptuel	19
2. Discussion de la qualité des données.....	19
a. Jeu de données abiotiques	19
b. Jeu de données biotiques.....	19
B. Discussion des résultats	19
1. Choix des formalismes : discussion des équations au sens biologique.....	19
C. Perspectives	22
Conclusion.....	23
V. Bibliographie	25

Introduction

En 2017, le vignoble français couvre une surface de 810 076 ha (France AgriMer, 2019). La valeur de la production viticole (hors subventions) estimée, en 2017, est à 11,2 milliards d'euro soit 27 % des 41,1 milliards d'euros générés par les produits végétaux bruts et transformés et 16 % des 71,8 milliards d'euros de production agricole totale (France AgriMer, 2018). 19% des surfaces des vignes mères de greffon ont été perdues en 10 ans à cause du « déperissement » (Rapport mission FAM-CNIV-BIPE, 2016). Ce phénomène engendre des pertes de rendement annuelles de l'ordre de 4.6 hL/ha (Plan National Déperissement du Vignoble, 2017).

Le déperissement se traduit par des baisses de production pluriannuelles irréversibles, voire la mort de la plante (Rapport mission FAM-CNIV-BIPE, 2016). Aujourd'hui, d'après la filière, les viticulteurs sont dans une impasse vis-à-vis des déperissements des ceps dus à divers facteurs tels que les pratiques agricoles, les pathologies notamment les maladies de bois contre lesquelles aucune méthode de lutte n'est disponible actuellement (INRA, 2014). A l'égard de ces problèmes, les interprofessions vitivinicoles, regroupées au sein du CNIV, avec le soutien du Ministère de l'Agriculture et de FranceAgriMer, se sont engagées dans un Plan National contre le Déperissement du Vignoble en 2016. Plusieurs partenaires, comme l'INRA, contribuent aux actions mises en place dans le cadre de ce plan.

En effet, le déperissement est un phénomène complexe résultant de la conjonction de stress multiples. Bien que souvent associé au développement de maladies du bois, le déperissement dépend également des contraintes abiotiques et biotiques, des pratiques culturales ainsi que de l'environnement socio-technique de l'exploitation. Dans ce contexte, le projet TraDévi² (2018-2020), vise à identifier les facteurs biotiques, abiotiques et techniques qui contribuent à l'affaiblissement et au déperissement des ceps. L'organisme porteur de ce projet est l'INRA de Montpellier et piloté avec plusieurs associés tel que le Ministère d'Agriculture, l'IFV, etc. En plus de l'INRA, plusieurs acteurs participent à la réalisation de ce projet (Montpellier SupAgro, les Chambres d'Agriculture et les lycées agricoles). Les UMRs SYSTEM et LEPSE de l'INRA de Montpellier où se déroule mon stage font partie du comité de pilotage du projet TraDévi. Au sein de ce projet, on cherche à comprendre les facteurs d'affaiblissement ou de déperissement de la vigne de façon globale (impacts combinés de l'environnement et des pratiques culturales) et à différentes échelles (ceps, parcelle, exploitation viticole). La modélisation sera donc utilisée comme outil d'intégration et de diffusion des connaissances scientifiques et expertes sur ce phénomène.

Ma mission s'insère dans ce cadre de la « Modélisation et synthèse des connaissances sur le déperissement », où on cherche à implémenter dans un modèle pré-existant « GrapePest » (Dagher, 2014) les connaissances acquises dans le cadre de ce projet sur l'élaboration et la perte du rendement, à l'échelle du cep sur un pas de temps pluriannuel quelle que soit l'origine. En particulier, les pertes de rendement liées à la disponibilité de l'eau et de l'azote et aux dommages causés par les bioagresseurs seront intégrés au modèle (Plan National Déperissement du Vignoble, 2017).

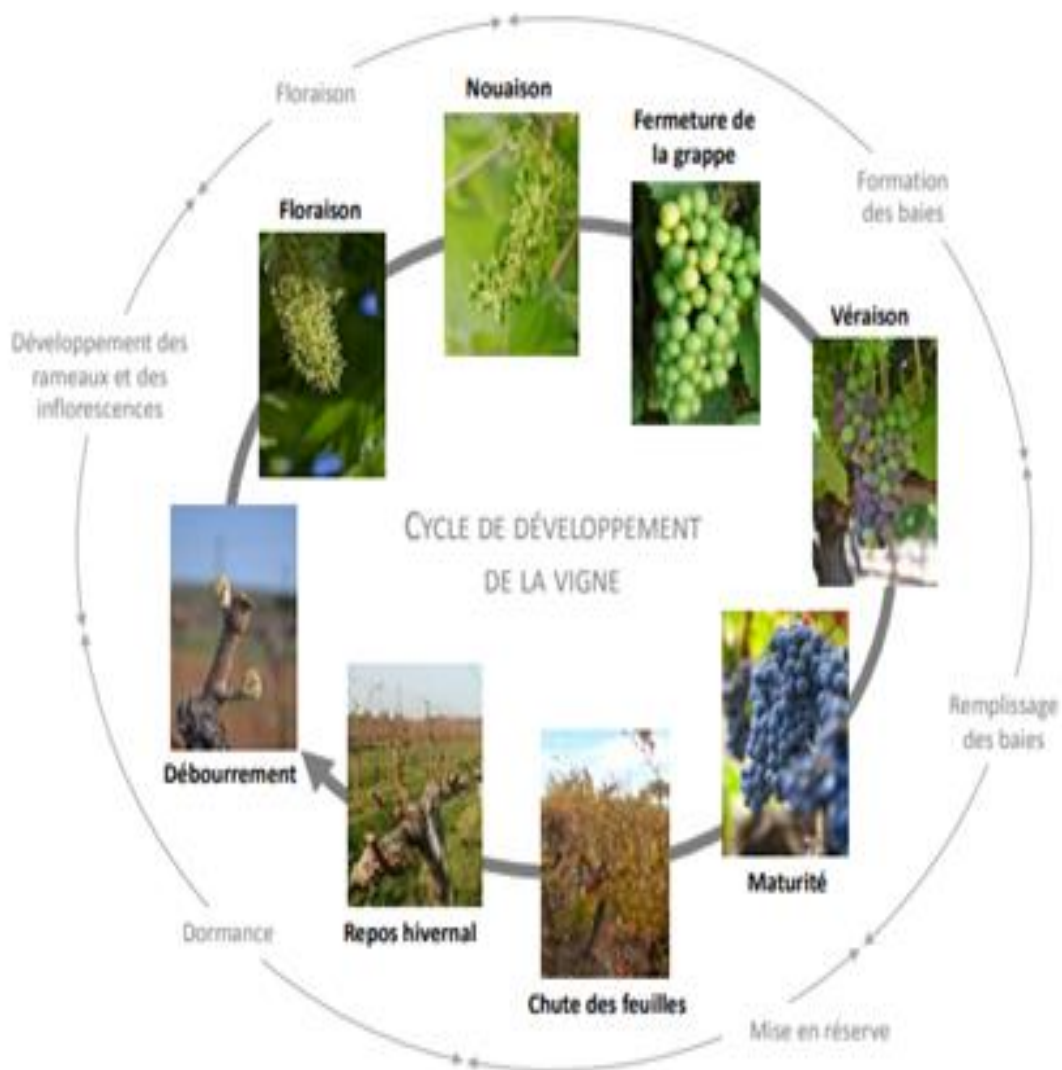


Figure 1 : Cycle annuel de développement de la vigne (d'après Guilpart, 2014). Le schéma représente les principaux stades phénologiques de la vigne (photos) et les principaux processus physiologiques (cercle extérieur en gris clair) au cours du cycle de la vigne. Une présentation détaillée des stades phénologiques de la vigne selon l'échelle d'Einhorn et Lorenz modifié par Coombe (1995) est présentée en Annexe 1

I. Etat de l'art et problématique

A. Ecophysiologie de la vigne

La vigne (*Vitis Vinifera* L.) est une espèce pérenne (Putz, 1991) ligneuse à croissance indéterminée, chez laquelle il existe une compétition trophique entre les feuilles et les fruits (Brisson et al., 2003). Les plantes pérennes ligneuses sont capables de conserver et développer leur système racinaire et continuent à étendre chaque année leurs organes aériens à partir des bourgeons latents (Reynier, 2016). La croissance et le développement s'accompagnent de la mise en réserve de substances élaborées (sucres, protéines, acides, etc.) dans les fruits et les graines et dans les parties vivaces aériennes ainsi que souterraines (Reynier, 2016).

1. Phénologie et cycle de développement (figure 1)

Le cycle de croissance de la vigne s'étend sous climat tempéré de mars à novembre dans l'Hémisphère Nord et de septembre jusqu'à mai dans l'Hémisphère Sud. Six principales phases de développement de la vigne ont été distinguées par Coombe (1995) :

(1) **le développement des rameaux et des jeunes inflorescences** : du débourrement jusqu'à la floraison ; (2) **la floraison** : de l'ouverture des fleurs à la nouaison (transformation des fleurs en fruits) ; (3) **la croissance herbacée des baies** : de la nouaison à la véraison ; (4) **la maturation des baies** : de la véraison jusqu'à la vendange ; (5) **la mise en réserve** : au plus tard de la vendange à la chute des feuilles. Cette étape est caractérisée par l'accumulation des éléments nutritifs (notamment carbone et azote) dans les organes pérennes, en particulier les racines. Ces réserves serviront à alimenter la croissance au débourrement du cycle suivant ; (6) **la dormance hivernale** : de la fin de la chute des feuilles au débourrement du cycle suivant. Il est à noter l'absence de dormance hivernale chez la vigne cultivée en conditions tropicales. Une présentation détaillée des stades phénologiques de la vigne selon l'échelle modifié par Coombe (1995) est disponible en annexe 1.

2. Physiologie de la croissance

Le principal facteur climatique influant le développement de la vigne est la température de l'air ambiant. Elle permet la reprise l'activité biologique des bourgeons et elle a un effet direct sur la plupart des mécanismes cellulaires. Il est donc intéressant d'utiliser la température comme mesure de l'état du développement de la vigne. Ainsi, en l'absence de contraintes environnementales, le développement des rameaux primaires est relié de façon robuste et linéaire au temps thermique (température de base de 10°C chez la vigne) (Lebon et al., 2004). La croissance en biomasse est déterminée par le rayonnement incident, par la capacité de la plante à intercepter ce rayonnement (fonction de l'indice foliaire et de l'orientation des feuilles) et par l'efficacité du processus de conversion du rayonnement en biomasse, caractérisé par le RUE (Radiation Use Efficiency, fonction de l'activité photosynthétique).

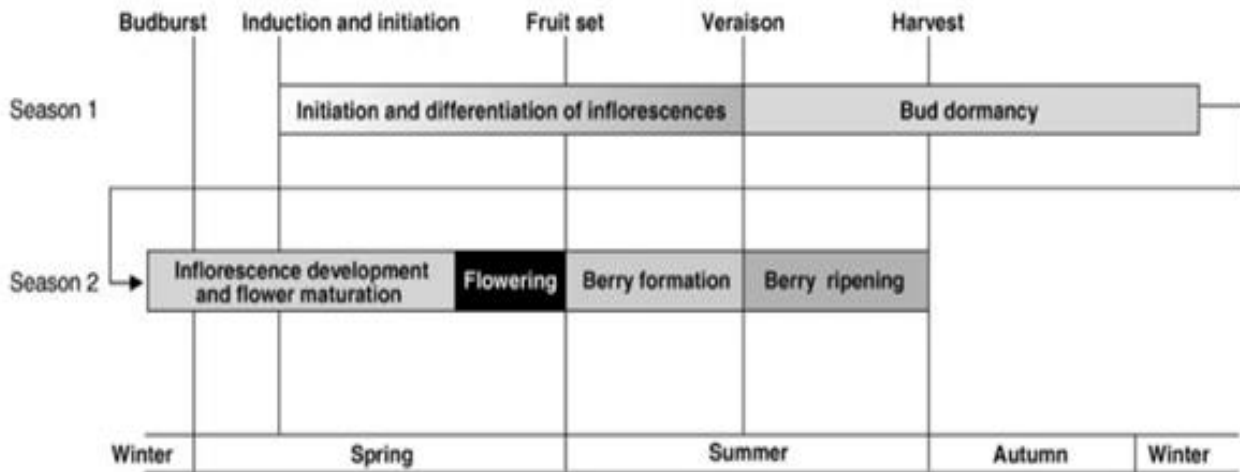


Figure 2 : Cycle de reproduction de la vigne sur deux saisons de production (Carmona et al., 2008)

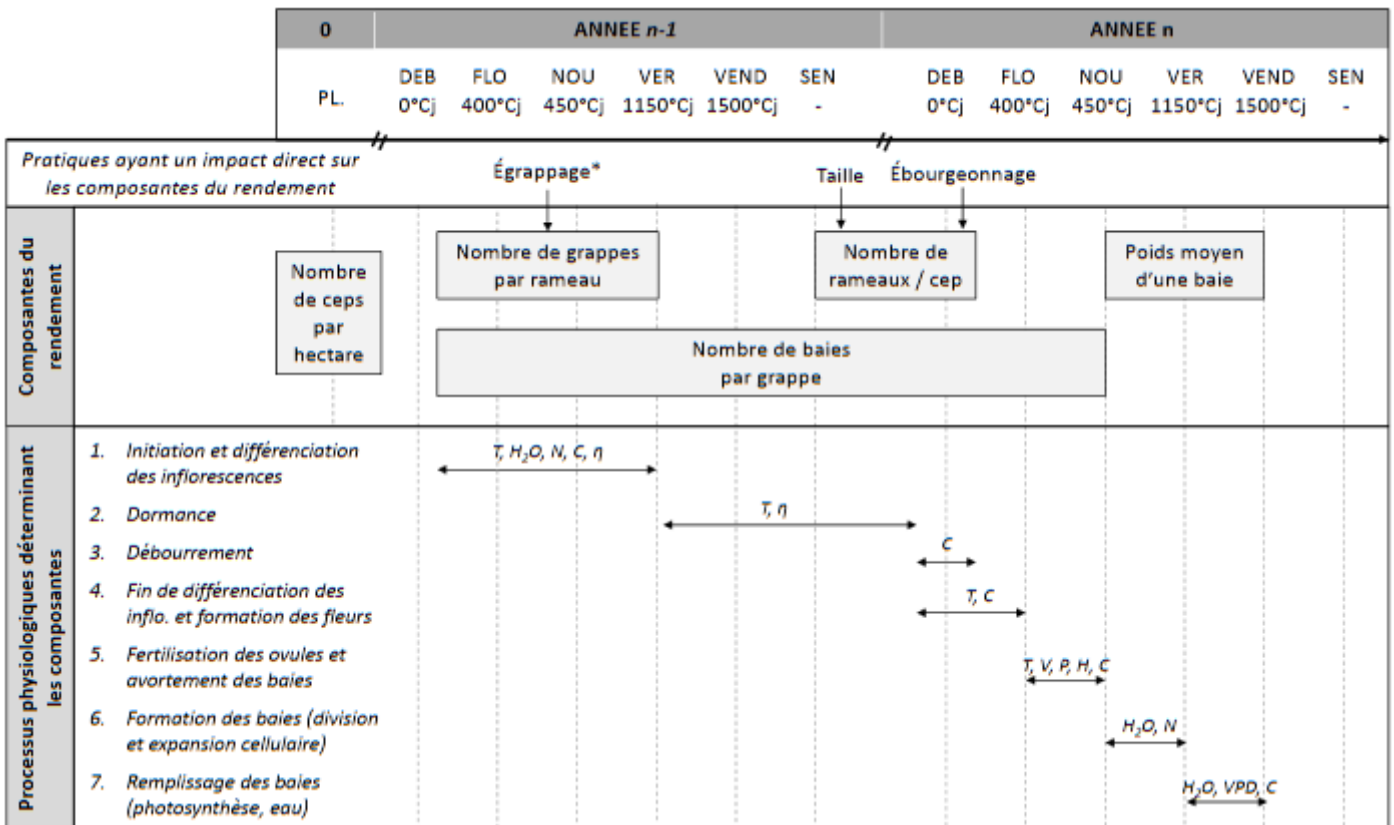


Figure 3 : Étapes et facteurs limitants de l'élaboration du rendement de la vigne (Guilpart, 2014). L'élaboration du rendement de la vigne se déroule sur deux années consécutives : l'année n-1 et l'année n, l'année n étant l'année de production. Les lettres au-dessus des flèches horizontales indiquent les facteurs limitants de chaque étape de l'élaboration du rendement. C : disponibilité en carbone et rapports source - puits. T : température. H₂O : stress hydrique. N : stress azoté. : Lumière, rayonnement. V : vent. P : précipitations. H : humidité de l'air. VPD : déficit de pression de vapeur. * l'égrappage agit directement sur le nombre de grappes par rameau mais est réalisé à l'année n. PL : plantation. DEB : débourrement. FLO : floraison. NOU : nouaison. VER : véraison. VEND : vendange. SEN : sénescence. °j : degré-jours en base 10°C.

3. Accumulation des réserves

L'accumulation des réserves chez la vigne est une étape essentielle dans son fonctionnement physiologique annuel et pérenne et sa durabilité (Holzapfel et al., 2010). Les parties pérennes (tronc et racines de structure) accumulent différents types de réserves : de l'amidon, des sucres solubles et des acides aminés dont les concentrations évoluent au cours du cycle de développement en fonction de l'offre des organes source et de la demande des organes puits (Pallas, 2009). Ces réserves, constituées durant l'année n-1, sont notamment mobilisées pour assurer la croissance végétative en début de cycle de l'année n (Holzapfel et Smith, 2012 ; Zapata et al., 2004). La reconstitution des réserves dans la plante dépend du bilan carboné (différentiel offre-demande) de la plante et démarre au plus tôt après la floraison (Champagnol, 1984).

4. Elaboration du rendement

Le rendement, exprimé en tonnes par hectare, peut être décomposé selon les composantes ci-dessous (Li, 2017) :

$$\text{Rendement} \left(\frac{t}{ha} \right) = \text{nb de ceps} / ha \times \text{nb de grappes} / \text{cep} \times \text{nb de baies} / \text{grappe} \times \text{poids moyen d'une baie}$$

Le rendement à l'échelle du vignoble dépend donc de la densité de plantation de la vigne, de la taille hivernale qui détermine le nombre de bourgeons et donc le nombre de grappes potentiel ainsi que du mode de conduite qui influence le microclimat, la vigueur et le succès du développement reproducteur (Carbonneau et al., 2015). L'élaboration du rendement de la vigne se déroule sur deux années consécutives (Vasconcelos et al., 2009 ; Carmona et al., 2008 ; Meneghetti et al., 2006; Li, 2017) comme l'indique la figure 2.

La variabilité interannuelle du rendement de la vigne est très grande pour une même parcelle. Elle est généralement supérieure à 15% et dépasse régulièrement 35% (Vasconcelos et al., 2009 ; Keller, 2010). Ces variations de rendement sont expliquées à 60% par les variations du nombre de grappes (i.e. variabilité de la fertilité des bourgeons latents), 30% par les variations du nombre de baies (i.e. variabilité du nombre de boutons floraux et/ou du taux de nouaison) et 10% par celles de la masse moyenne d'une baie (Dry, 2000 ; Li, 2017). Cependant, ces pourcentages sont largement discutés dans le milieu scientifique et sont dépendants de plusieurs paramètres, notamment des conditions pedo-climatiques et du cépage. D'après Guilpart et al. (2014), le nombre de grappes par plante et le nombre de baies par grappe comptent pour presque 90% des variations du rendement viticole pour les cépages Syrah et Aranel en conditions méditerranéennes. Ces deux composantes du rendement sont assez sensibles au déficit hydrique et azoté, pendant une période critique concernant le développement des bourgeons de la base, située après la floraison de l'axe primaire en croissance (400 à 700°Cd après le débourrement) de la saison précédente (figure 3).

B. Facteurs limitants du rendement : contraintes abiotiques et biotiques

Le rendement réel (YACT : actual yield) dépend des facteurs climatiques (rayonnement, température) et génétique déterminant le potentiel de rendement et des facteurs biotiques et/ou abiotiques limitant ce rendement, en particulier le développement de maladies cryptogamiques et les contraintes hydriques et nutritionnelles (Savary et Willocquet, 2014).

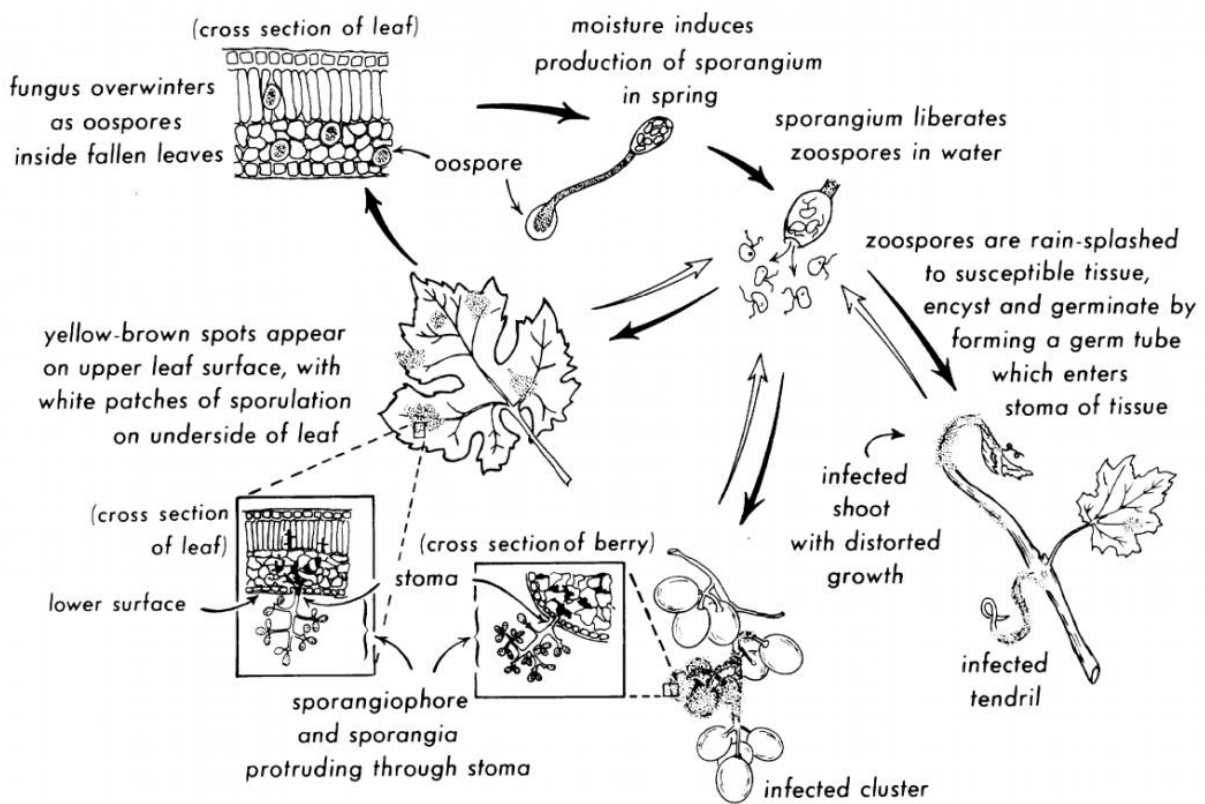


Figure 4 : Cycle biologique d'*Erysiphe necator* sur vigne (Ellis, 2008)

Tableau 1 : Caractéristiques biologiques de l'oïdium et du mildiou

Maladie	Mode de conservation	Mode de reproduction	Structure sexuée	Mode de dissémination
Oïdium	Mycélium dormant/ cléistothèce	Reproduction sexuée	Cléistothèce	Ascospores
Mildiou	Oospores	Reproduction asexuée	Sporangiophore	Sporanges à zoospores

1. Contraintes abiotiques

a. Contraintes hydrique et azotée

Plusieurs études ont mis en évidence que les contraintes hydrique et azotée sont deux facteurs limitants du fonctionnement de la vigne rencontrés dans les régions méditerranéennes (Celette et al., 2008 ; Celette et al., 2010). Les déficits en eau et/ou en azote réduisent la surface foliaire et l'activité photosynthétique d'où la faible production de biomasse (Zhao et al., 2004). Lorsque ces contraintes sont fortes et ou prolongées, le rendement ainsi que la mise en réserve des sucres diminuent, favorisant l'affaiblissement de la plante (Choat et al., 2018).

Effet sur le nombre d'inflorescences par cep (ou fertilité des bourgeons) :

Le manque d'eau et/ou d'azote dans le sol impactent négativement le développement reproducteur au sein des bourgeons latents, diminuant ainsi leur fertilité (Keller, 2010 ; Guilpart, 2014 ; Li et al., 2015). En effet, la fertilité des bourgeons et le nombre de baies par grappe la deuxième année sont déterminés par les conditions hydriques et azotés lors de la floraison la première année (Guilpart et al., 2014) (figure 3). La fertilité des bourgeons peut être réduite également par des excès en eau ou en azote qui favorisent le développement végétatif au dépend du développement reproducteur (Vasconcelos et al., 2009 ; Keller, 2010).

Effet sur le nombre de fleurs par inflorescence :

Selon les travaux de Guilpart (2014), conduits sur Syrah et Aranel, une contrainte hydrique avant ou à floraison engendre des pertes en nombre de baies de l'année n. La nutrition azotée est également un facteur clé du développement floral : le nombre de fleurs augmente avec la quantité d'azote disponible (Alleweldt et Ilter, 1969)

Effet sur le poids moyen d'une baie :

L'alimentation hydrique et azotée est déterminante lors de la croissance des baies, tant pour le volume que pour la qualité de la production. La taille finale des baies dépend étroitement des conditions hydriques pendant la phase de divisions cellulaires (2 à 3 semaines post-nouaison) ainsi que lors de la phase de grandissement cellulaire pre- et post véraison (Ojeda et al., 2001). Plusieurs études ont montré que l'alimentation hydrique de la vigne a un effet plus important que la nutrition azotée sur le poids de la baie (Ollat et al., 2002 ; Keller, 2010b). Ce dernier est positivement corrélé à l'alimentation hydrique de la vigne (Ollat et al., 2002 ; Vasconcelos et al., 2009).

2. Contraintes biotiques

Le rendement atteignable (Ya pour attainable yield) peut être réduit par l'effet de facteurs réducteurs tels que les dommages causés par les organismes nuisibles (maladies, insectes, mauvaises herbes).

Les principales maladies de la vigne : oïdium et mildiou

L'oïdium est une maladie causée par le champignon *Erysiphe necator* Schewein, qui est l'agent pathogène le plus répandu et le plus dommageable sur les vignes (Keller, 2010; Rumbolz, Gubler, 2005; Qiu et al., 2015). La biologie de cet agent pathogène est illustrée par la figure 4 et le tableau 1.

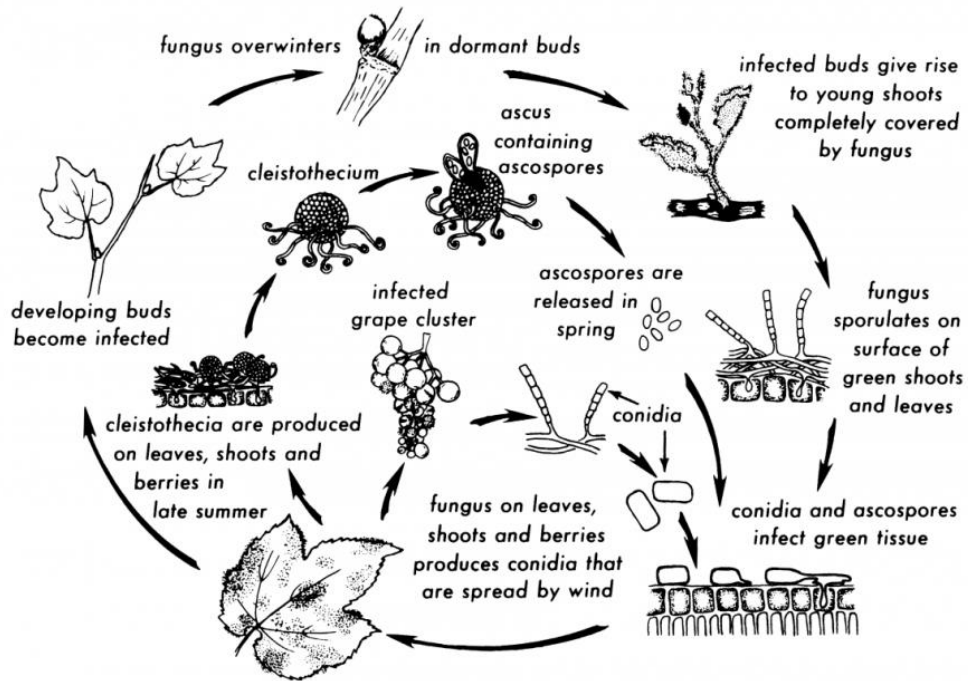


Figure 5 : cycle biologique de *Plasmopara. viticola* sur vigne (Ellis, 2008)





<p>Agressions biologiques (stress biotiques)</p> 	<p>Champignons (champignons du bois, champignons aériens, micro-organismes de la grappe, champignons telluriques...), bactéries et phytoplasmes, virus (court noué, virus de l'enroulement...), ravageurs, (insectes phytophages, acariens phytophages...) maladies non infectieuses (anomalies génétiques, dépérissement de la Syrah...)</p>
<p>Environnement physique (stress abiotiques)</p> 	<p>Changement climatique, aléas climatiques, sol, écosystèmes</p>
<p>Pratiques viticoles et caractéristiques de l'exploitation</p> 	<p>Pratiques culturelles, caractéristiques de l'exploitation, stratégies d'exploitation, de valorisation et d'investissement</p>
<p>Environnement sociotechnique (extérieur à l'exploitation)</p> 	<p>Matériel végétal disponible, traitements disponibles, recherche, réglementation, normes, contrôle, incitations, conseil et formation, environnement économique et financier, environnement social, patrimoine immatériel, marché final et attentes des consommateurs</p>

Figure 6 : Facteurs jouant sur la contribution directe ou indirecte aux dépérissements (Riou et al., 2016)

Les feuilles touchées deviennent plus ou moins déformées et parfois chlorotiques et en cas d'attaque sévère, elles peuvent se dessécher et chuter (INRA-ephytia). Les inflorescences et les baies sont plus susceptibles quand elles sont jeunes (Gadoury et al., 2011). Une infection assez précoce des fleurs pendant la période de croissance peut conduire à une mauvaise fructification. Quand les baies sont fortement attaquées au début du cycle par ce champignon, elles vont ratatiner ou tomber, alors que les infections ultérieures endommagent le péricarpe et causent des fissures lors de la maturation (Keller, 2010). Les dégâts de l'oïdium sur des vignobles non traités peuvent varier de 45% à 97% (sudvinbio, 2013).

Le mildiou est une maladie engendrée par *Plasmopara viticola* Berk. & M.A. Curtis, qui est un parasite obligatoire (Salinari et al., 2006) capable de réaliser plusieurs cycles rapidement ; il s'agit alors d'une maladie polycyclique (INRA-ephytia) (figure 5). Ce champignon peut infester tous les tissus verts de la vigne et plus particulièrement les jeunes feuilles et baies. Le mildiou impacte négativement l'élaboration du rendement, la maturation des fruits et la mise en réserve (Keller, 2010).

Les principaux ravageurs de la vigne : tordeuses ou vers des grappes

Le papillon *Lobesia botrana* (Denis & Schiffermüller) est l'un des ravageurs les plus nuisibles des vignobles dans les régions européennes et méditerranéennes (Caffarra et al., 2012). Les larves d'eudémis (*L. botrana*) sont moins agressives durant la floraison, mais produisent davantage de dégâts après la véraison (Caffarra, 2012). En effet, les chenilles de la deuxième et troisième génération perforent les grains de raisin, favorisant l'installation de maladies fongiques notamment la pourriture grise (*Botrytis*) (Agro-BASF). La cochyliis *Eupoecilia ambiguella* est un ravageur des inflorescences et des raisins dans différentes phases de développement (raisins verts et mûrs). Toutefois, seules les chenilles de deuxième génération seulement produisent des dégâts (Filipescu et al., 2005), or ces dernières sont peu rencontrées dans les vignes languedociennes.

C. Les dépérissements de la vigne et leurs causes

1. Dépérissement de la vigne

Par définition, les dépérissements de la vigne désignent la baisse pluriannuelle subie de la productivité du cep et/ou sa mort prématurée brutale ou progressive. Les facteurs induisant ce phénomène sont multiples (Riou et al., 2016) : Ils sont la conséquence d'agressions biologiques, climatiques et de pratiques viticoles (figure 6). C'est un phénomène irréversible qui « conduit à la mort prématurée des ceps de vigne et même à l'arrachage des parcelles » et les « maladies du bois » restent la cause la plus répandue (Francetvinfo, 2018).

2. Les causes du dépérissement

Les maladies de bois de la vigne préoccupent les viticulteurs vu les dégâts qu'elles occasionnent et les problèmes économiques qu'elles engendrent (perte de récolte, mortalité des ceps, etc.) (IFV, 2007). Trois principaux types de dépérissements liés à différents champignons sont observés dans les vignobles : l'eutypiose, l'esca et le Black Dead Arm (BDA) (IFV, 2007). Ces maladies de bois (MDB) peuvent être associées soit à un seul champignon, soit à un complexe de champignons. D'un point de vue économique, les données chiffrées ne sont pas très nombreuses mais elles révèlent l'ampleur des pertes liées aux MDB. En 2014, les pertes

Tableau 2 : Comparaison entre les différents modèles développés sur la vigne

Nom du modèle	Auteur, année	Compartiments considérés	Cycle(s) considéré(s)	Processus simulés	Facteur(s) abiotique(s) considéré(s)	Facteur(s) biotique(s) considéré(s)
Modèle simpliste de croissance et développement de la vigne	<i>Bindi et al., 1997</i>	Organes annuels (feuilles et grappes) et pool de biomasse	Cycle de C	Ontogenèse, croissance foliaire, accumulation et partition de la biomasse et croissance des grappes	-	-
STICS Vigne	<i>Brisson et al., 2003 ; Garcia de Cortazar-Atauri, 2006</i>	Organes annuels, organes pérennes, pool de biomasse et pool des réserves	Cycle de C et de N	Développement, croissance aérienne et racinaire, élaboration du rendement, le fonctionnement hydrique et azoté	Effet de la contrainte hydrique et azotée	-
GreenLab	<i>Pallas, 2009</i>	Organes annuels et pool de biomasse	Cycle de C	Organogenèse et topologie, production et allocation de biomasse	Effet de la contrainte hydrique	-
GENECROP (-P)	<i>Savary et Willocquet, 2014 ; Nogueira Junior et al., 2017</i>	Organes annuels et pool de biomasse	Cycle de C	Croissance et développement de la plante, production et partition de biomasse	-	Mécanismes de dommage liés aux bioagresseurs
WheatPest	<i>Willocquet et al., 2008</i>	Organes annuels et pool de biomasse	Cycle de C	Croissance et développement de la plante, production et partition de biomasse	-	Mécanismes de dommage liés aux bioagresseurs
GrapePest	<i>Dagher, 2014</i>	Organes annuels et pool de biomasse	Cycle de C	Croissance et développement de la plante,	-	-

estimées pour la filière viticole en France varient de 2,1 à 3,4 millions d'hectolitres. En Australie, les pertes de rendement dues à l'eutypiose ont été estimées à 860 kg/ha pour le cépage Syrah, soit une perte de 20 millions de dollars australiens, et 740 kg/ha pour le Cabernet Sauvignon. En Californie, elles s'élèvent à 260 millions de dollars par an pour l'eutypiose. Les viroses font aussi partie des facteurs biotiques favorisant le dépérissement des vignes. Le Court-Noué et l'Enroulement sont les viroses les plus graves pour la vigne (Claverie et al., 2016 ; IFV, 2015) mais elles ne sont pas les seules. Plusieurs virus associés au virus d'enroulement aboutissent à des pertes de rendement et une baisse de la qualité du fruit.

Enfin, la sécheresse est un facteur important reconnu comme responsable de la mortalité massive des arbres. Les contraintes hydriques favorisent les dysfonctionnements vasculaires pouvant provoquer la mort de la plante (Choat et al., 2018). Chez la vigne, le phénomène de dépérissement peut être accentué selon le porte-greffe utilisé. En effet, selon Torregrosa et al. (2011), depuis l'été 2008-2009, plusieurs parcelles établies sur le porte-greffe 161-49C présentent des dépérissements en Languedoc. Généralement, on observe ces dépérissements à partir de la troisième année de plantation. Ils débutent par un dessèchement et une baisse de la vigueur et de la récolte puis les ceps finissent par dépérir (Torregrosa et al., 2011 ; Benateau et al., 2014).

Aucun de ces facteurs ne peut à lui seule (ou même tous ensemble) expliquer le dépérissement et son importance et donc vu la multitude des contraintes que la vigne subisse, il était intéressant de modéliser le développement l'élaboration du rendement de cette culture

D. Analyse comparative de différents modèles de croissance de la vigne (tableau 2)

Les modèles de croissance développés sur la vigne ces dernières décennies présentent différents niveaux de complexité selon leurs objectifs respectifs. Les modèles les plus récents permettent d'intégrer de simuler, l'impact des ravageurs et des maladies sur la production est un élément essentiel à estimer pour confronter les différents scénarios ayant une incidence sur les revenus des agriculteurs (Donatelli et al., 2017). Quelques-uns de ces modèles sont décrits ci-dessous du plus simple au plus complexe.

1. Modèle de croissance de V. Vinifera L. (Bindi et al., 1997)

Il s'agit d'un modèle mécaniste simple de simulation de la croissance de la vigne, paramétré au moyen d'observations expérimentales sur des plantes considérées exemptes de stress biotique et abiotique. Dans ce modèle, les principaux processus simulés sont l'ontogenèse, le développement des feuilles, l'accumulation de biomasse et la croissance des fruits.

2. STICS vigne (Brisson et al., 2003 ; Garcia de Cortazar-Atauri, 2006)

Le modèle STICS est un modèle dynamique modulaire complexe, à pas de temps journalier, qui simule le comportement d'un système sol-culture au cours d'une année. Les principaux processus simulés par ce modèle sont la croissance et le développement des cultures, ainsi que les bilans hydrique et azoté. STICS simule le comportement du sol-système de culture sur un ou plusieurs cycles de culture pour simuler des rotations. Il s'agit d'un modèle de culture développé sur un grand nombre de cultures annuelles et pérennes (Brisson et al., 2003) qui

calcule des variables agronomiques (rendement, consommation d'intrants) et environnementales (pertes d'eau et d'azote) et qui a comme entrées les variables relatives au climat, au sol et au système de culture. Ses variables de sortie concernent notamment le rendement et l'environnement en termes de drainage et de lixiviation des nitrates.

3. GreenLab vigne (Pallas, 2009)

GreenLab est un modèle stochastique générique de développement et de croissance de la plante. Il combine les processus d'organogenèse et de morphogenèse à l'échelle de l'organe et de l'axe individuel en quantifiant la production de biomasse à l'échelle de la plante entière. Ce modèle est un outil puissant qui permet d'estimer les flux et la répartition de biomasse entre les organes ainsi que le niveau de compétition trophique à l'échelle de la plante. A chaque pas de temps, l'état trophique de la plante est calculé selon le ratio entre l'offre et la demande en biomasse. Pour évaluer les simulations pluriannuelles, ce modèle inclut la mobilisation et le stockage des réserves.

4. GENECROP (Savary et Willocquet, 2014 ; Nogueira Júnior et al., 2017)

GENECROP est un modèle générique simple qui simule la croissance des plantes, développé au début sur les cultures annuelles. Il intègre différents processus de croissance de la plante liés à sa dynamique de développement, à l'accumulation de biomasse et à l'élaboration du rendement (Savary et Willocquet, 2014). GENECROP-P a été généré à partir de ce modèle-là pour être appliqué sur cultures pérennes. Le système modélisé est une plante avec un pas de temps d'un journalier. Le modèle prend en considération la dynamique entre les saisons ainsi que le processus de réallocation réelle d'assimilats provenant des réserves de racines et de tronc (Nogueira junior, 2017). Ce modèle a donné aussi naissance à « GenePest », un modèle intégrant les mécanismes de dommage correspondant aux dommages de bioagresseurs traités et qui comprend des instructions d'exécution d'autres modèles (Donatelli et al., 2017).

5. GrapePest (Dagher, 2014)

Le modèle GrapePest est basé sur la structure et les principes du modèle WheatPest (figure 7). C'est un modèle de simulation mécaniste mis au point pour intégrer à la fois les facteurs de production variables et les profils de dommage correspondants. Ce modèle a été développé afin de simuler les pertes de récolte sur blé causées par les ravageurs et les maladies, seuls ou combinés à différentes situations (Savary et Willocquet, 2014). En effet, les processus physiologiques pris en compte sont suffisants pour prendre en charge les différents mécanismes de dommage associés aux divers bioagresseurs étudiés sur le blé (Savary et al., 2018). Les processus intégrés dans WheatPest sont : la croissance foliaire, la production et la répartition de la biomasse dans les différents organes, la remobilisation des glucides des tiges vers les grains, etc. Le système considéré dans le modèle GrapePest est de 1 m² de vigne, avec un pas de temps de simulation de 1 jour. Il décrit une vigne saine qui pousse dans des conditions hydriques et azotées optimales (Dagher, 2014).

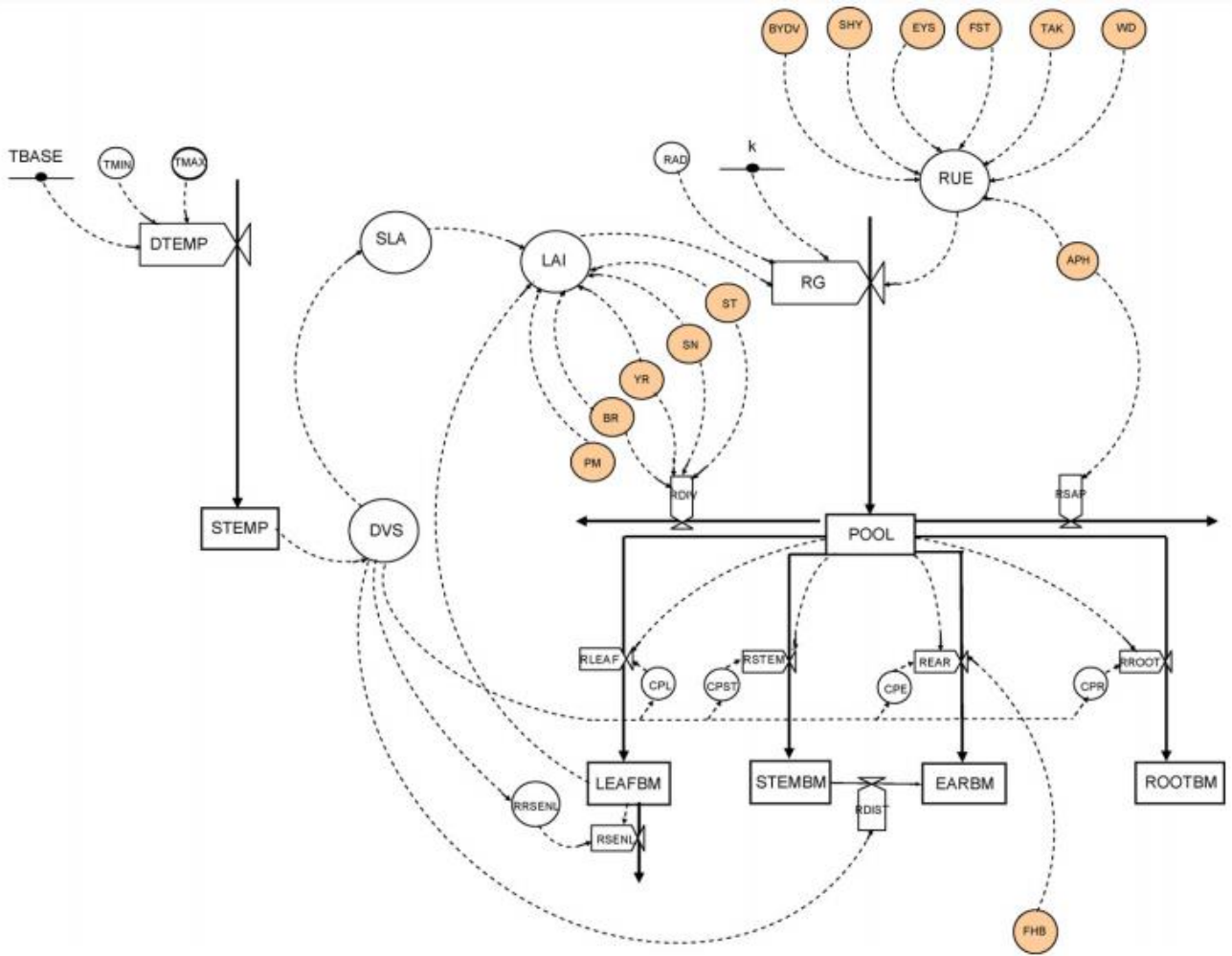


Figure 7 : Structure de WheatPest (Willoquet et al., 2008)

Le modèle prend en entrée les données météorologiques (les températures minimales et maximales journalières en °C et le rayonnement global quotidien en MJ.m⁻²), ainsi que les variables et déterminants de la situation de production du système de culture et du profil des dégâts. Les sorties du modèle comprennent des variables dynamiques : stade de développement, biomasse (matière sèche) des organes, surface foliaire et rendement final.

La structure de GrapePest comme WheatPest permet toutefois d'intégrer l'effet du stress hydrique sur les processus physiologiques de la plante. Il est ainsi intéressant d'adopter ce modèle dans le cadre de notre sujet et l'adapter selon nos objectifs.

E. Problématique du stage et démarche

La problématique générale de ce travail est donc :

- **Peut-on intégrer dans le modèle GrapePest (Dagher et al., 2014) les effets des stress abiotiques (hydrique et azoté) et biotiques (oïdium, mildiou et tordeuses) sur les processus de croissance et développement et sur l'élaboration du rendement de la vigne à un pas de temps pluriannuel ?**

Plusieurs sous-questions découlent de ce questionnement :

- Comment intégrer dans le modèle existant les pertes de performance et de récolte liées aux bioagresseurs ?
- Comment tenir compte des facteurs abiotiques aggravant les pertes de rendement, en particulier les contraintes hydrique et azotée ?
- Quels compartiments et quelles variables doivent être ajoutés pour tenir compte de l'aspect pluriannuel ?

1. Objectifs

Le travail de Dagher (2014), était de poser les bases d'un modèle de croissance et de développement de la vigne saine (aboutissant au rendement atteignable) dont la structure et les formalismes permettraient ensuite de le coupler à différents modules décrivant l'action sur différents processus des principaux bioagresseurs de cette culture. L'objectif de mon stage est donc d'intégrer dans « GrapePest » (Dagher, 2014) les connaissances acquises dans le cadre d'analyse de résultats expérimentaux sur l'élaboration et la dégradation du rendement par rapport à une situation potentielle, à l'échelle du cep tout en tenant compte de l'aspect pluriannuel. L'évolution des pertes de rendement à long terme résultant des contraintes biotiques et abiotiques sera analysée et modélisée.

Les livrables attendus de ce stage sont les suivants :

- Production d'un set de formalismes mathématiques permettant de modéliser les pertes de récolte dus aux différents facteurs précédemment évoqués ;
- Production d'une méthodologie d'estimation des paramètres nécessaires au modèle.

Ce travail repose sur une hypothèse de travail forte ; les résultats sont issus de la combinaison d'une démarche de conceptualisation et d'une analyse statistique des données expérimentales.

Tableau 3 : Modalités étudiées : ensemble des différents traitements eau X azote testés et nombre de plants pour le dispositif en pots de TraDevi

Eau (% réserve utile)	Azote (équivalent Unité ou kg/ha)	Nombre de plantes
80%	160 U	6
30%	160 U	7
10%	160 U	7
80%	80 U	6
30%	80 U	7
10%	80 U	7
80%	0 U	6
30%	0 U	6
10%	0 U	7

2. Démarche

La première étape du stage vise à prendre connaissance des concepts sous-jacents au modèle existant GrapePest et de leur numérisation (Dagher et al., 2014), ainsi que de la bibliographie sur d'autres modèles pré-existants pour bien situer le contexte. La deuxième étape consiste à conceptualiser de nouveaux formalismes dans GrapePest (Dagher, 2014) pour prendre en compte les effets de différentes contraintes (contraintes hydrique et azoté et stress liés aux bioagresseurs les plus dommageables) sur la production de biomasse, son allocation dans les différents compartiments de la plante, et l'élaboration du rendement. Les éléments de structure et de stockage sont aussi à intégrer au modèle vu leur nécessité pour conférer à ce modèle une portée pluriannuelle.

II. Matériel et méthodes

A. Dispositifs expérimentaux

Les données de fonctionnement et d'élaboration du rendement de la vigne sous contraintes abiotiques et biotiques sont issues de deux dispositifs expérimentaux différents.

1. Dispositif en pots pour le suivi de l'effet des contraintes abiotiques sur la croissance et le rendement

Le dispositif expérimental est situé sur le campus de « La Gaillarde » de Montpellier SupAgro. Trois lots de plants différents ont été suivis durant trois années d'expérimentation, subissant des traitements hydriques et azotés répartis sur la durée de l'expérience (tableau 3). Ces plants passent leur première année en pépinière, puis reçoivent les traitements sur le site expérimental pendant la deuxième et la troisième année. Le premier lot correspond aux plantes ayant débuté leur croissance en 2016, le deuxième en 2017 et le troisième en 2018.

a. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé est composé de plants de vigne en pots de cépage *Vitis vinifera* L. 'Sauvignon Blanc' qui est un cépage très utilisé dans la région de Languedoc-Roussillon. Les effets des différentes doses de fertilisation en azote sont facilement observables sur la qualité des moûts d'où la pertinence du choix de ce cépage. Le porte greffe est le SO4, qui est connu par sa tolérance élevée au phylloxera et très répandu dans les vignobles français.

b. Traitements

Sur l'ensemble des 3 lots, 9 modalités différentes sont testées comme détaillé dans le tableau 3. Les quantités d'azote utilisées sont 0, 80 ou 160 unités d'azote (U.N) correspondant à des équivalents en kilogrammes par hectare. Ces traitements azotés sont appliqués du stade « 3-4 feuilles » jusqu'à la floraison. Les régimes hydriques consistent en des irrigations de façon à cibler 10%, 30% et 80% de la réserve utile. Ils sont appliqués sur la période floraison-récolte. L'application des traitements d'irrigation a été pilotée grâce à un système de pesons installés sous 6 et 8 pots par modalité, avec un poids cible correspondant au niveau d'irrigation visé.

Tableau 4 : Variables mesurées dans le cadre de TraDevi

Mesure	Outil/méthode	Echantillon	Fréquence
Statut azoté de la feuille	SPAD	1 feuille/plante	1 fois/moi
Poids des pots	Système de pesons	6 plantes/modalité	Chaque jour
Potentiel de tige	Chambre à pression	1 feuille/ plante/ modalité	Floraison, véraison et vendange
Surface foliaire totale	planimètre	Les feuilles laies et liaies par plante	Floraison, véraison et vendange
Nombre de fleurs	VitisFlower®	6 plantes/modalité	Floraison, véraison et vendange
Masses sèches des structures végétatives et reproductrices	Destruction des plantes	3 à 5 plantes par modalité	Floraison, véraison et vendange

c. Acquisition des données et variables suivies

Les mesures réalisées sur le dispositif en pots (TraDevi) comprennent essentiellement le suivi phénologique de la vigne, des mesures de développement et de croissance (surface foliaire, nombre d'inflorescences, de fleurs et de baies, taille des baies), de biomasse sèche des différents compartiments (aériens et souterrains), de stockage des sucres (amidon) dans les organes de réserve (bois et racines) et des mesures d'états hydrique (poids des pesons) et azoté (SPAD et azote total du sol et de la plante) (tableau 4). Dans la suite, nous allons nous intéresser aux données du lot 2 en 2018.

2. Dispositif pour le suivi de l'effet des contraintes biotiques sur la croissance et le rendement

Dans cette partie, nous utilisons des données acquises dans le cadre d'un projet de recherche de l'action « Damage » du métaprogramme « SmaCH » de l'INRA (de 2013 jusqu'à 2016). Les données ont été acquises sur une parcelle expérimentale du domaine du Chapitre de Montpellier SupAgro. L'action « Damage » vise à analyser et modéliser les pertes des récoltes causées par les bioagresseurs sur les différentes cultures. Dans le cas de la vigne, on avait choisi une approche « multipest » qui prenait en compte des maladies fongiques : oïdium, mildiou et Botrytis et les tordeuses ou vers des grappes pour les insectes ravageurs.

a. Matériel végétal

La parcelle est située à Villeneuve-lès-Maguelone, au lieu-dit Argèle, dans le sud du département de l'Hérault. Elle s'étend sur 2.2 ha et comprenait une partie en Grenache et une partie en Mourvèdre (figure 8). Les vignes ont été plantées en 2008, les rangs étant orientés Nord-Sud. Pour obtenir un jeu de données assez homogène, nous avons choisi de nous concentrer sur la Grenache car les données recueillies sur ce cépage sont plus complètes.

b. Traitements

Le suivi s'est déroulé pendant 3 années (2013, 2014, et 2015) dans 4 modalités (figure 8) :

- Témoin non traité (TNT) : permet de suivre la dynamique des bioagresseurs en absence de traitements et le rendement atteignable en l'absence de tout traitement phytosanitaire ;
- Témoin viticulteur : c'est un témoin de la façon de travail des agriculteurs dans la région et donc on peut considérer que le rendement obtenu avec la couverture des traitements est le maximum atteignable dans nos conditions ;
- Traitement IPM-50 : mode de pilotage qui vise à réduire de moitié la quantité des produits pulvérisés (en modulant la dose et la fréquence de traitements) ;
- Traitement Innobio : mode de pilotage qui vise à utiliser autant que possible des méthodes de biocontrôle et des produits utilisés en AB.



Figure 8 : Localisation et disposition des quatre modalités pour le Grenache. Expérimentation Damage pour le suivi des contraintes biotiques

c. Acquisition des données et variables suivies

Les données météo étaient disponibles directement grâce à la station implantée sur la parcelle. Pour les suivis de données maladies et ravageurs neuf placettes étaient suivies pour chaque modalité sauf la modalité TNT (six placettes). Chaque placette est constituée de 6 ceps et les données étaient récoltées cep par cep. Les notations ont été faites à 7 stades clés du développement de la vigne : 5-6 feuilles étalées, boutons floraux, mi-floraison, baies de taille de pois, fermeture de grappe, véraison et maturité.

Pour relier le stress biotique aux pertes de rendement, nous avons utilisé un indicateur synthétique de l'état phytosanitaire de la vigne sur l'ensemble de l'année. Il résume les dégâts engendrés par les bioagresseurs sur les grappes : l'AIDB (Assessment Indicator of Damage in Grape Bunches) (Fermaud et al., 2016). Il synthétise les niveaux de sévérité de chaque maladie ; oïdium, mildiou et Botrytis (auquel on ne s'intéressera pas) et du ravageur (tordeuse) à deux stades phénologiques clés : floraison et véraison (Fermaud et al., 2016). L'idée est d'adopter une approche « multipest » qui permet de caractériser un niveau de sévérité des attaques de ces bioagresseurs sur une saison et qui sera reliée à une réduction de rendement en biomasse des grappes. Ainsi, nous avons choisi, pour toutes les modalités, tous les ceps correspondant aux stades qui nous intéressent (floraison : 11/06/2013, véraison : 07/08/2013 et vendanges : 17/09/2013).

Nous avons converti la notation de sévérité en classe en considérant la valeur médiane de chaque classe de pourcentage, puis moyenné les valeurs des 5 grappes de chaque cep pour pouvoir appliquer la formule proposée par Fermaud et al. (2016) : Ces deux derniers traitements permettent d'obtenir des niveaux de protection phytosanitaires intermédiaires.

$$AIDB(\%) = 100 - (A \times B)$$

où :

- **A** correspond aux premières attaques des ravageurs et maladies, de la floraison à la nouaison ; à cette période le mildiou (YDMF) et le Botrytis (YGMF) peuvent infecter les inflorescences du cep. Le facteur de réduction A s'écrit:

$$A = [100 - (YDMF + YGMF)]$$

- **B** correspond aux infestations ultérieures se produisant pendant la croissance et la maturation des baies. Durant cette période, les 3 maladies (oïdium (YPM), mildiou (YDMB), Botrytis (YGMB) et les ravageurs (tordeuses (YTM)) étudiés peuvent affecter les fruits restants. La biomasse de fruits est donc potentiellement réduite à ce stade d'un facteur de : $B = [1 - (YDMB + YPM + YGMB + YTM)]/100$.

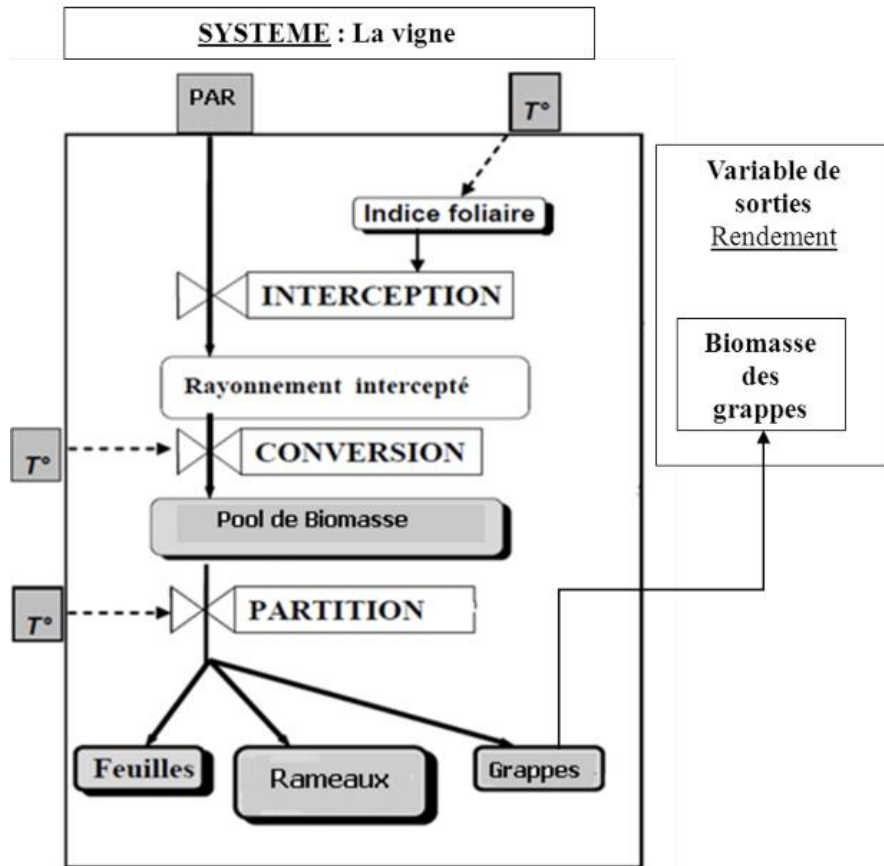


Figure 9 : Représentation simplifiée de la structure GrapePest (Dagher, 2014).

Les flèches pleines représentent des flux de matière ; les flèches en tirets des flux d'information ; les valves : Les processus ; Variable d'entrée : PAR (Rayonnement photosynthétiquement actif), T° (Température) ; variable d'état : Indice foliaire, Rayonnement intercepté ; Composantes : pool de biomasse, feuilles, rameaux et grappes.

B. Description du modèle GrapePest initial (Dagher, 2014) (figure 9)

Le modèle GrapePest a été développé en se basant sur la structure et les principes du modèle WheatPest (Willoquet et al., 2008). Du point de vue conceptuel, le système étudié est la culture de vigne. Seuls les organes annuels (les feuilles, les rameaux et les grappes) sont pris en compte. A ce stade, seuls la croissance et le développement de la vigne au cours d'une saison culturale ont été modélisés, en l'absence de toute contrainte (hydrique ou nutritionnelle par exemple) et de toute perte due aux bioagresseurs. Les principales fonctions simulées dans GrapePest sont : (i) l'interception du rayonnement par les feuilles, (ii) la conversion de ce dernier en biomasse et (iii) le partitionnement de cette biomasse vers les différents compartiments (les feuilles, les rameaux et les grappes). Le modèle fonctionne sur une saison, du jour du débourrement jusqu'à la récolte en considérant un système de 1 m² de et un pas de temps journalier de simulation. Les variables d'entrées sont les données climatiques (la température journalière moyenne et le rayonnement photosynthétiquement actif journalier (PAR)) et la principale variable de sortie d'intérêt est le rendement en masse sèche des grappes. Les sorties du modèle consistent en des séries temporelles de variables dynamiques : stade de développement (DVS) (du débourrement jusqu'à la récolte), la biomasse sèche des différents organes (feuilles, tiges et grappes), surface foliaire (SLA) ; la masse sèche des grappes étant la composante de rendement qu'on cherchait à quantifier.

Les formalismes pris en compte dans le modèle GrapePest ont été choisis en sélectionnant les formalismes de WheatPest les mieux adaptés pour représenter la croissance et le développement de la vigne. Ce choix a été piloté aussi par le but final d'utilisation du modèle constitué par les variables de sortie d'intérêt pour le couplage avec des modèles de perte dues aux bioagresseurs. Les différents formalismes de base de la croissance et du développement de la vigne sont résumés dans l'annexe 2.

C. Démarche de conceptualisation du modèle

Notre démarche de modélisation est basée sur 3 étapes (Roux et al., 2010, figure 10) : la description conceptuelle (Lamanda et al., 2012), le développement mathématique et enfin la modélisation numérique. Afin d'établir le modèle conceptuel, nous avons repris celui de Dagher (2014) comme décrit dans la partie B, en combinaison avec la démarche de conceptualisation proposée par Lamanda et al. (2012). Cette démarche vise en premier lieu à identifier structurellement les limites, les composantes et l'environnement du système étudié. Les agrosystèmes en particulier, interagissent avec un environnement multidimensionnel qui est décomposé en environnement actif (comprenant les entrées du système) et environnement passif (comprenant les sorties du système). Cette décomposition a pour but de conserver les principales interactions entre les composantes du système.

D. Analyse statistique et estimation des paramètres

Comme indiqué par nos objectifs, nous cherchons à simuler des pertes de rendement par rapport à une situation sans contraintes. Nous avons ainsi réalisé une analyse de variance sur l'indicateur de rendement (BM sèche des grappes) à récolte en fonction des niveaux d'eau et d'N. Les résultats (annexe 3) montrent un effet significatif du traitement azoté (80U donnant le meilleur rendement). Pour le traitement hydrique, nous allons considérer le 80% comme étant le traitement idéal dans nos expérimentations.

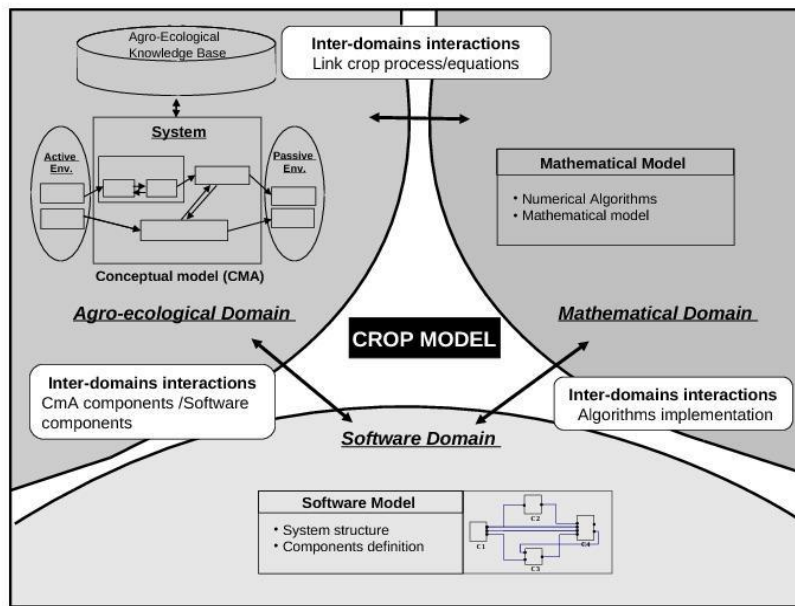


Figure 10 : Les trois dimensions de construction de modèles de cultures (Roux et al., 2010)

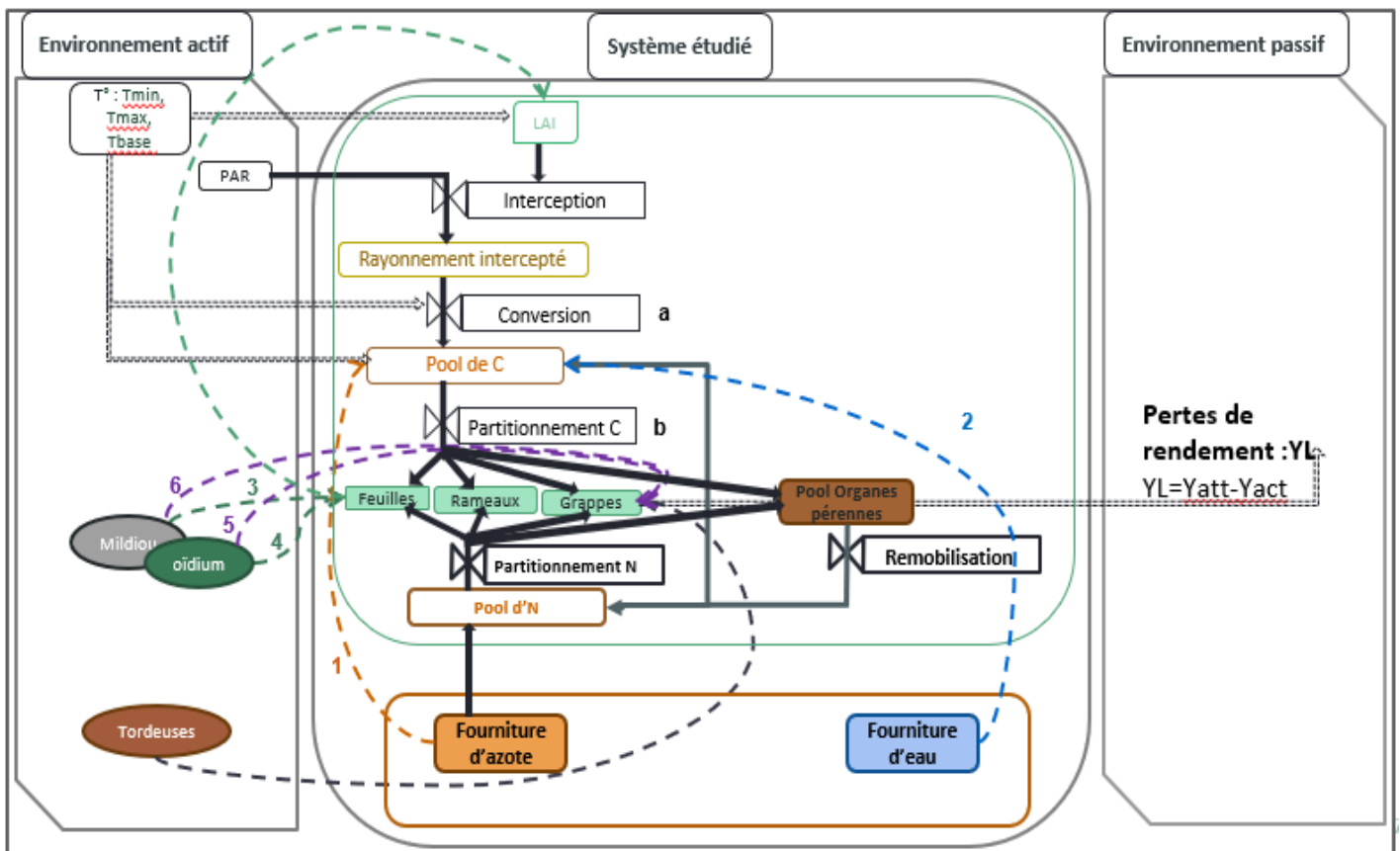


Figure 11 : Structure générale du nouveau modèle GrapePest. Les valves : les processus. Les flèches continues : flux de matière. Doubles flèches en pointillés : flux d'information. Les couleurs n'ont aucune signification particulière.

Nous allons nous intéresser au calcul de valeurs relatives de la variable d'intérêt (biomasse totale produite) pour chaque traitement par rapport au traitement de référence (80U80%) selon la formule :

$$\text{variation de BM} = \frac{BM_{\text{traitement}} - BM_{80U80\%}}{BM_{80U80\%}}$$

Après, ces équations en fonction des traitements seront paramétrées à chaque stade à l'aide d'une régression linéaire multiple.

Le paramétrage des formalismes des coefficients d'allocation de ce C est compliqué : les p-values issues des régressions multiples se sont montrées non significatives ($\alpha=0.05$), nous avons donc essayé de regarder les effets de nos traitements hydriques et azotés séparément, en ajustant à chaque fois les nuages de points obtenus en suivant le modèle linéaire simple ou polynomial selon le meilleur R^2 (annexe 7). Il est à noter qu'un formalisme n'est appliqué qu'en cas de différence significative entre les moyennes de la variation relative de notre variable d'intérêt pour un traitement donné et celle du traitement optimal. Dans la suite, nous n'avons pas calculé de coefficients de variation par rapport au traitement 80U80% puisqu'on n'a pas de répétitions par traitement et donc nous pouvons pas faire de test de student pour savoir pour quel traitement nous gardons le même coefficient que le traitement de référence ou de le faire varier, donc nous avons considéré directement des équations qui relient le coefficient au traitement hydrique et/ou azoté (cf. Résultats B. 1).

III. Résultats

A. Conceptualisation du nouveau modèle pour la simulation des pertes de rendement

1. Structure générale (figure 11)

Dans cette partie, nous allons décrire les nouveaux compartiments et processus intégrés dans le modèle conceptuel « GrapePest » pour simuler l'élaboration du rendement sous contraintes abiotiques et biotiques au pas de temps pluriannuel. Les équations sous-jacentes à ces processus sont détaillées dans le paragraphe B. 1.

Dans l'environnement actif, les sévérités des principaux bioagresseurs de la vigne (oïdium, mildiou et tordeuses) ont été intégrées au modèle préexistant. Les flèches (3) et (4) traduisent l'impact de ces bioagresseurs sur les feuilles en les déformant et en réduisant sa surface (taches chlorotiques). Leurs effets sur les grappes (flèches 5 et 6) incluant les perforations des grains de raisin sont simulés par le paramètre d'évaluation des dégâts **AIDB** (cf. matériel et méthodes).

Dans le système étudié, un compartiment sol (profondeur exploitable par les racines) a été créé. Ce dernier permet de considérer les fournitures azotée et hydrique du sol qui vont conditionner le fonctionnement carboné et azoté de la plante. Un compartiment pérenne sans distinction des organes (bois, racines) a aussi été ajouté aux compartiments annuels (feuilles, rameaux, grappes) initiaux. Ce compartiment pérenne est primordial simuler les pertes de performances et de rendement inter-millésimes. Ainsi, le pool de C issu des processus d'**interception** et de **conversion** du rayonnement est réparti entre les trois organes annuels et le compartiment pérenne par processus de **partitionnement ou allocation**. La fourniture azotée du sol alimente le pool d'N qui, lui aussi est alloué aux différents organes de la vigne. L'impact

de la fourniture en N sur le pool de C (production de C et son allocation vers les différents organes) est représenté par la flèche (1). La flèche (2) traduit l'effet du traitement hydrique sur la production (a) et l'allocation de C (b) vers les organes annuels et pérennes.

Les réserves en C et N stockées dans le compartiment pérenne peuvent être remobilisées depuis les organes annuels particulièrement en début de cycle pour la reprise de végétation. Dans notre modèle, nous nous sommes intéressés au développement mathématique lié à la remobilisation du C des pérennes (flèche 3).

La variable de sortie d'intérêt est le rendement réel (YACT), correspondant à la biomasse sèche des grappes. Ce rendement réel inclut les pertes de rendement dues aux stress biotiques et abiotiques. Nous avons considéré les effets eau-azote comme additifs selon les résultats d'ANOVA de la BM des grappes en fonction des traitements hydrique et azoté.

2. Hypothèses structurantes du modèle

Temps de simulation :

- La simulation est réalisée sur 2 années, avec un pas de temps journalier. Elle commence à partir de la date de débourrement de la première année.

Compartiments :

- Le système considéré dans le modèle est une placette de 1 m² comprenant la plante et la profondeur exploitable par les racines du sol ;
- Les feuilles primaires et secondaires ne sont pas distinguées idem pour les rameaux ;
- Le pool des réserves correspond au pool total sans séparation des racines et du tronc. Seules les réserves carbonées sont simulées dans ce travail ;
- Le rendement est impacté par les stress hydrique, azoté et par les bioagresseurs les plus dommageables sur la vigne (mildiou, oïdium et tordeuses).

Processus :

- Ni la dynamique des populations de bioagresseurs ni les interactions entre eux ne sont pris en compte ;
- La compensation des pertes dues aux ravageurs par la vigne est négligée.
- Pas de simulation d'effet d'N sur le pool N
- Pas de simulation du nombre d'inflorescences/baies
- Pas d'intégration de l'effet de la conduite de la canopée sur le pool de C

B. Développement mathématique du nouveau modèle pour la simulation des pertes de rendement

1. Choix des formalismes

Chaque flèche du modèle conceptuel (figure 11) correspond à un formalisme mathématique associé à un set de paramètres reliant les processus entre eux. Pour chaque processus simulé, le choix des formalismes est basé sur les équations déduites de l'analyse des données expérimentales en situation de contraintes abiotiques et biotiques.

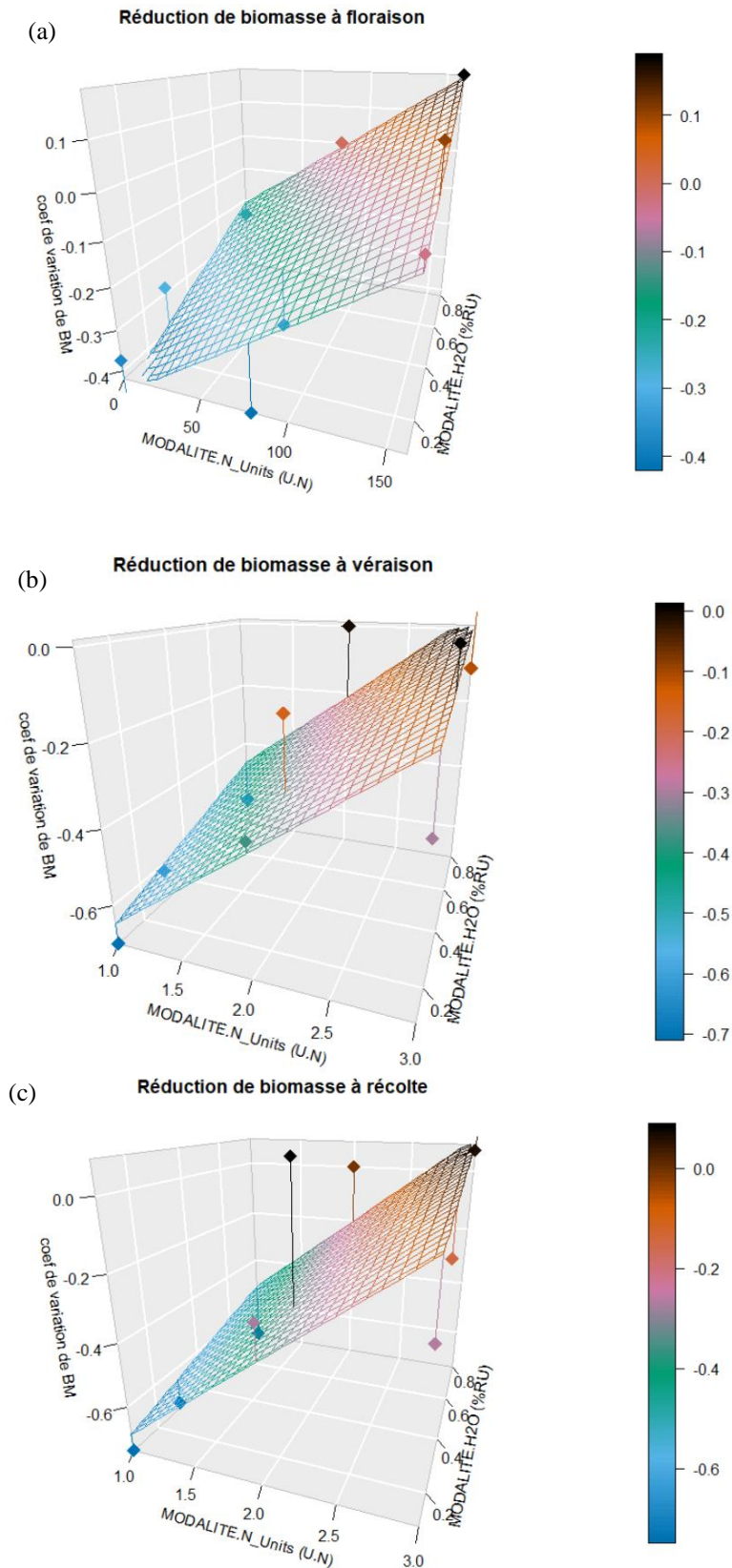


Figure 12 : Réduction de biomasse en fonction des contraintes hydrique et azotée, exprimée à (a) à floraison ($R^2=0.8$). (b) à véraison ($R^2=0.4$) et à récolte ($R^2=0.2$). L'intensité de réduction augmente du rouge sombre au bleu

Comme indiqué dans le paragraphe A. 1., nous avons intégré les effets des contraintes abiotiques (eau et azote) sur la réduction du pool de C disponible (flèches (1) et (2) de la figure 11), dépendant de la production journalière de C et son allocation vers les différents organes annuels (feuilles, rameaux et grappes). Un nouveau compartiment correspondant aux organes pérennes (racines et bois) a été ajouté au modèle pour simuler les processus de stockage et de remobilisation du C et le bilan C sur un pas de temps pluriannuel. Enfin, les coefficients de perte relative de rendement due aux contraintes biotiques par rapport au rendement potentiel ont été paramétrés. Afin d'identifier la combinaison de traitement hydrique et azoté optimisant le rendement final, les données à récolte de TraDevi ont été comparées (cf. matériel et méthode D.). Nous considérons ainsi dans la suite la combinaison 80U d'azote-80% de la réserve utile comme le traitement de référence pour calculer les différents coefficients de réduction de production et d'allocation du C ainsi que du rendement final.

a. Effet des contraintes hydrique et azotée sur la production totale de C

Les dynamiques de production de C sont déduites de la production de BM. Des coefficients de réduction de la BM produite sous contraintes eau et azote par rapport au traitement de référence (80% ; 80U) ont été paramétrés pour simuler les réductions de rendement.

La relation entre le coefficient de variation de BM totale produite (cf. matériel et méthodes D.) et les traitements hydrique et azoté est représentée au stade floraison dans la figure 12. La régression linéaire multiple issue de ce jeu de données montre que la fourniture azotée ainsi que la fourniture hydrique impactent significativement la production de BM à la floraison ce qui est représenté dans la figure 13 (p-value<5%). Toutefois, cette BM est plus impactée par l'eau que par l'N pourtant les traitements hydriques ne sont pas différenciés.

A partir de la véraison, l'effet qui domine est effet N et malgré la différenciation des traitements hydriques différenciés (p-value=0.38), idem à récolte.

Après cette analyse statistique, les formalismes de variation de BM retenus aux trois stades sont les suivants :

$$\text{A floraison : } \mathit{variation}_{BM} = -0.5 + 0.002N + 0.4W \quad (R^2=0.8, \text{ p-value}=0.006) \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\text{A véraison : } \mathit{variation}_{BM} = -0.57 + 0.004N \quad (R^2=0.65, \text{ p-value}= 0.0087) \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\text{A récolte : } \mathit{variation}_{BM} = -0.62 + 0.004N \quad (R^2=0.6, \text{ p-value}= 0.01) \quad (\text{Eq. 3})$$

N est exprimé en unité d'N et W en %RU

Où : RG (Relative Growth) est la croissance journalière en biomasse ($\text{g.m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$).

a. Effet des contraintes hydrique et azotée sur les règles d'allocations de C

Après avoir quantifié l'effet des contraintes abiotiques sur la production totale de C, il est pertinent de focaliser sur l'effet de ces contraintes sur l'allocation du C vers les différents organes.

Tableau 5 : Coefficients d'allocation calculés. FLO18 : entre débourrement et floraison de l'année 2018. VER18 : entre floraison et véraison. REC18 : entre véraison et récolte.

Prélèvement	Traitement	Partie pérenne	Rameaux	Feuilles	Grappes
FLO18	0N10%	10,06	-2,61	-5,60	-0,86
FLO18	0N30%	-0,79	0,54	1,22	0,09
FLO18	0N80%	-0,08	0,31	0,70	0,07
FLO18	80N10%	9,37	-2,61	-5,35	-0,41
FLO18	80N30%	-2,80	1,19	2,51	0,31
FLO18	80N80%	-3,32	1,33	2,71	0,28
FLO18	160N10%	104,57	-28,39	-69,15	-6,03
FLO18	160N30%	-0,67	0,45	1,17	0,14
FLO18	160N80%	-0,37	0,39	0,84	0,14
VER18	0N10%	0,25	0,06	0,11	0,57
VER18	0N30%	1,20	-0,03	-0,28	0,08
VER18	0N80%	1,03	0,06	-0,21	0,11
VER18	80N10%	0,25	0,06	0,11	0,57
VER18	80N30%	0,24	0,09	0,17	0,50
VER18	80N80%	0,34	0,10	0,17	0,39
VER18	160N10%	0,18	0,08	0,17	0,57
VER18	160N30%	0,21	0,12	0,20	0,47
VER18	160N80%	0,24	0,19	0,28	0,28
REC18	0N10%	0,28	0,07	0,08	0,57
REC18	0N30%	10,25	0,38	0,52	-10,15
REC18	0N80%	0,34	0,15	0,21	0,30
REC18	80N10%	0,36	0,04	0,14	0,34
REC18	80N30%	0,23	-0,02	0,08	0,72
REC18	80N80%	0,34	0,15	0,21	0,37
REC18	160N10%	0,36	0,09	0,23	0,18
REC18	160N30%	0,22	0,14	0,37	0,17
REC18	160N80%	0,37	0,16	0,30	0,14

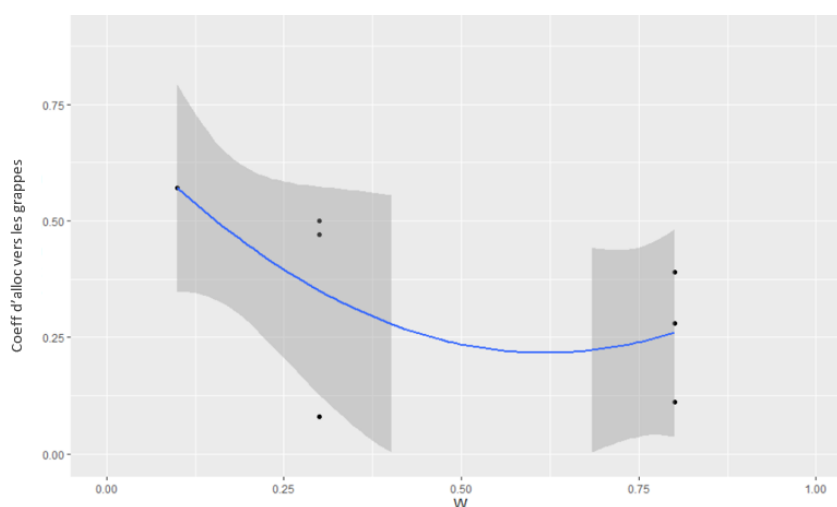


Figure 13 : Variation de l'allocation du C vers les grappes entre floraison et véraison. W : traitement hydrique (%RU)

Les variations des coefficients, selon le niveau du stress hydrique et azoté, à un stade par rapport au stade d'avant sont représentés dans le tableau 5.

L'approche vise à appliquer par la suite le coefficient d'allocation directement dans le modèle et à chaque période (entre deux stades successifs) pour prendre en compte leur variation avec la phénologie de la plante. Le calcul de ces coefficients a été réalisé sur les données du lot 2 de l'expérimentation en pots (tableau 5).

L'analyse de ces coefficients montre une augmentation de l'allocation de C vers les organes aériens (tiges, feuilles et grappes) entre floraison (FLO18) et véraison (VER18). Plus on fournit de l'eau, plus la plante alloue de C vers ces organes. A récolte, selon le traitement, l'allocation vers les pérennes augmente un peu et elle diminue pour les grappes. Plus on a de l'eau, moins on alloue vers les grappes (figure 13). Les coefficients d'allocation entre débourrement et floraison apparaissent incohérents. De façon surprenante, entre le débourrement et la floraison la BM de la partie pérenne est réduite de 2.8% correspondant à une diminution d'environ 10g. Sur la base des résultats ci-dessus, deux approches ont été retenues par la suite pour simuler les variations d'allocations de BM par rapport au traitement de référence :

1- une approche dynamique par allocation du C de la floraison jusqu'à la récolte (tableau 5) traduisant la variation relative de l'évolution de répartition de la BM vers chaque compartiment i. Nous l'appliquerons directement dans le modèle sans l'interpoler au cours du temps ;

2- une approche statique de répartition du C entre les organes au débourrement et à floraison intégrant les rapports de la BMi par rapport à la BM à chacun des stades.

Dans la suite du mémoire, nous notons CCPi (Carbone Coefficient of Partitioning) pour le coefficient de répartition à débourrement et à floraison et CCAi (Carbone Coefficient of Allocation) pour le coefficient d'allocation entre floraison et véraison puis entre véraison et récolte.

A débourrement, quel que soit le traitement, nous avons considéré que 100% du C est alloué vers les pérennes vu qu'à ce stade on n'a pas encore d'organes aériens bien développés :

$$CCPP=100\% \text{ RG}(\text{récolte}) \text{ (Eq. 4)}$$

A floraison, les régressions linéaires multiples entre les coefficients de répartition de C dans chacun des organes et les contraintes eau x N ont montré que la contrainte N impactait la répartition de BM dans les pérennes. Moins on a d'N dans le sol, plus on a de C dans les pérennes. L'équation à intégrer dans GrapePest donc :

$$CCPP = 27.6 - 0.07N \quad (R^2=0,5, \text{ p-value}=0,02) \text{ (Eq. 5)}$$

Ni l'effet de l'eau ni de l'azote n'a été observé en revanche sur la répartition C dans les autres organes à flo ($p>5\%$). Les coefficients de répartition au jour j vers chaque compartiment i (CCPi) par rapport au traitement de référence 80U-80% sont donc les suivants :

$$CCPS= 9.5\% \text{ RG} \text{ (Eq. 6) ;}$$

$$CCPL=20.6\% \text{ RG} \text{ (Eq. 7) ;}$$

$$CCPC=1.5\% \text{ RG} \text{ (Eq. 8) ;}$$

Où : RG est la croissance en BM pour le traitement de référence ($\text{g.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$).

Tableau 6 : Formalismes explicitant les coefficients d'allocation selon la significativité des paramètres de la régression linéaire

	CCAL	CCAS	CCAC	CCAP
FLO-VER	$0.14+0.003W$ (R ² =0.72, p-value=0.03)	$0.06+0.12W$ (R ² =0.75, p-value=0.06)	$0.04-0.35W+0.2W^2$ (R ² =0.54, p-value=0.04)	NS
VER-REC	NS	$0.06+0.03W$ (R ² =0.43, p-value=0.06)	NS	NS

Tableau 7 : Tableau récapitulatif des formalismes pour l'aspect abiotique.

CCAi : coefficient d'allocation de BM vers l'organe i. i={L (feuilles), S (tiges), C (grappes), P (pérennes)}. CCPi : coefficient de répartition de BM vers l'organe i. i={L (feuilles), S (tiges), C (grappes), P (pérennes)}. *détail des formalismes des coefficients de répartition à débourrement et à floraison

**détail des formalismes des coefficients d'allocation à véraison (paramétré entre floraison et véraison) et à récolte (paramétré entre véraison et récolte)

Stade	Processus		Formalisme retenu	
Floraison	Perte de production de C		$0.5 + 0.002N + 0.4W$	
Véraison	Perte de production de C		$-0.57 + 0.004N$	
Récolte	Perte de production de C		$-0.62 + 0.004N$	
Répartition de C				
	CCPL	CCPS	CCPC	CCPP
Débourrement	0	0	0	$100\% RG_{(récolte)}$
Floraison	$20.6\% RG$	$9.5\% RG$	$1.5\% RG$	$27.6 - 0.07N$
Allocation de C				
	CCAL	CCAS	CCAC	CCAP
FLO-VER	$0,143+0,0028W$	$0.06+0.12W$	$0.04-0.35W+0.2W^2$	$0.34 RG_{(ver)}$
VER-REC	$0.21 RG_{(rec)}$	$0.06+0.03 W$	$0.37 RG_{(rec)}$	$0.34 RG_{(rec)}$

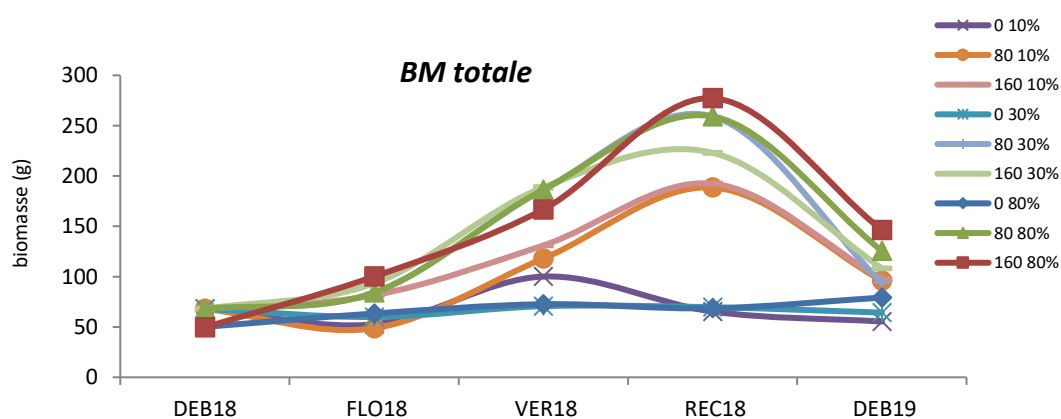


Figure 14 : Dynamique de la BM de la plante entre le débourrement (DEB18) et le débourrement de l'année suivante (DEB19). FLO18 : floraison en 2018. VER18 : véraison en 2018. REC18 : récolte en 2018.

Nous avons retenu 3 équations selon la significativité des paramètres des régressions linéaires (tableau 6). Ces équations montrent l'effet de l'eau sur les coefficients d'allocation vers les tiges (à véraison et récolte) et les grappes (à véraison). L'ensemble des formalismes retenus au final sont décrits dans le tableau 7.

b. Effet des contraintes hydriques et azotée sur la remobilisation du C stocké dans les organes pérennes

Pour relier les 2 saisons, nous avons suivi la dynamique du C entre la récolte de l'année 2018 et le débourrement de l'année 2019 sur le lot 2 (figure 14). Nous notons une diminution de la BM totale entre récolte (2018) et débourrement (2019) qui s'explique par le fait qu'après vendange on coupe les structures aériennes (taille de la cane hivernale). Seul le C dans les organes pérennes (tronc, racines) entre ces deux stades a donc été analysé. Ce dernier est stable entre la récolte et le débourrement (p-value =0,053). Donc nous avons considéré que 100% du C stocké peut être remobilisé pour la croissance annuelle post-débourrement.

Pour la remobilisation des réserves carbonées, nous allons considérer le coefficient de répartition de la BM à débourrement et à floraison, qui reflète la trajectoire des sucres solubles.

c. Effet des bioagresseurs

Pour estimer les pertes de rendement dues aux bioagresseurs, l'objectif est de relier les dégâts observés, caractérisés par l'AIDB, à la perte de rendement observée expérimentalement. Grâce aux données issues de « Damage », nous avons commencé par calculer un rendement maximal (Y_{max}) en termes de biomasse des grappes par rapport auquel nous allons calculer la réduction du rendement. Il a été estimé en traçant la courbe de densité cumulée des données du rendement par cep, toutes modalités confondues (annexe 4).

Sur cette courbe, nous avons estimé la valeur de Y_{max} comme le rendement pour lequel 95% des individus ont un rendement inférieur à cette valeur. De point de vue agronomique, nous considérons ce rendement maximal comme étant le rendement atteignable (Y_{att}). Ensuite, on calcule une perte (ou parfois un gain) de rendement relative due aux maladies et ravageurs Y_{Lbio} selon l'équation :

$$Y_{Lbio} = \frac{Y_{max} - Y_{act}}{Y_{max}} \text{ (Eq. 9)}$$

Où : - **Yact** correspond aux situations d'élaboration du rendement réel observé.

La relation entre la perte relative de rendement et les dégâts dus aux bioagresseurs, résumés par l'AIDB, est présentée sur la figure 15 pour les 4 modalités regroupées car normalement elles ne diffèrent entre elles que selon le niveau du traitement phytosanitaire et donc au niveau d'attaques des bioagresseurs ce qui est pris en compte par l'AIDB. Nous constatons une forte variabilité des pertes de rendement relatives, surtout pour des faibles valeurs de l'AIDB.

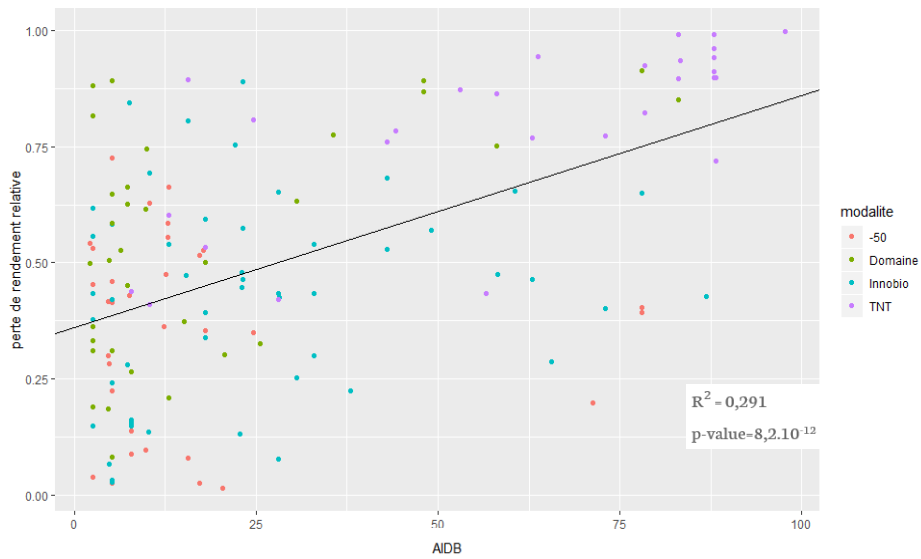


Figure 15 : régression linéaire de la réduction du rendement en fonction de l’AIDB

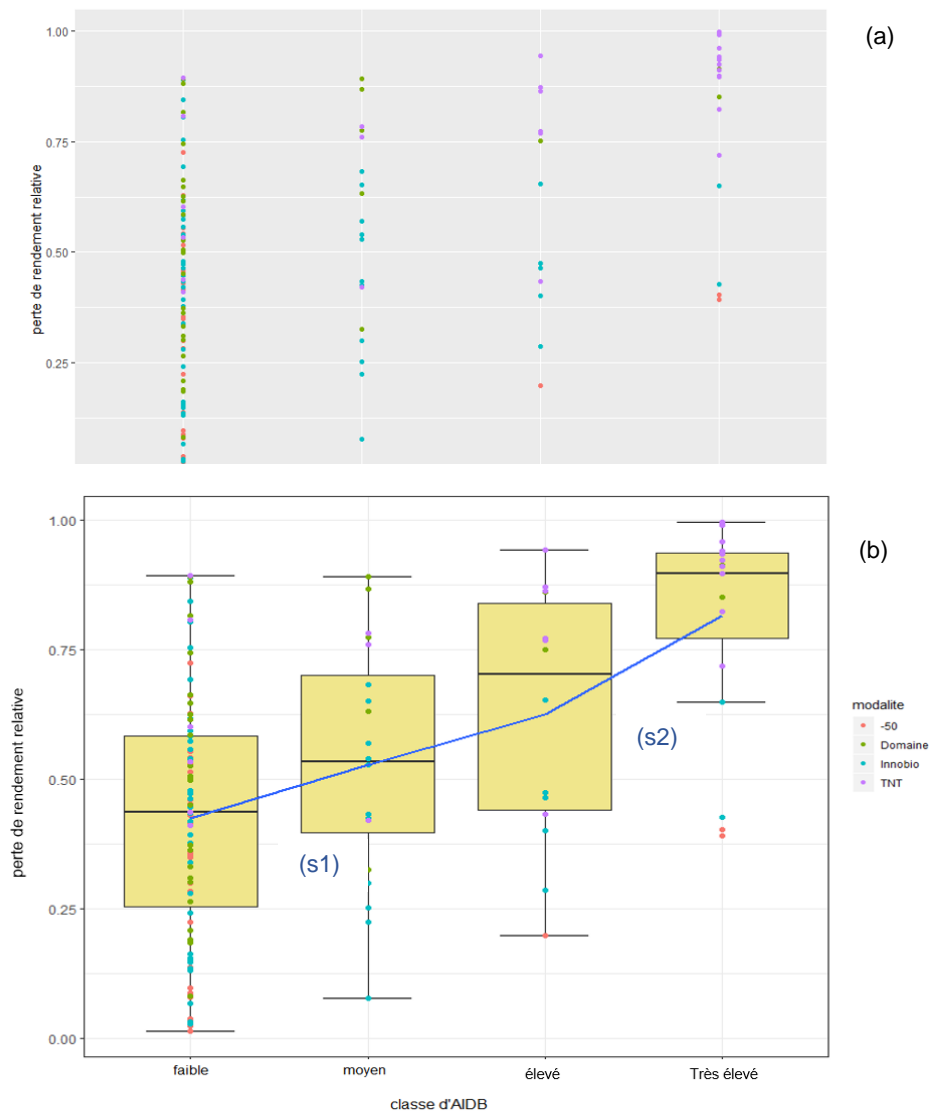


Figure 16 : Approche par classes d’AIDB. (a) Réduction du rendement en fonction des classes d’AIDB. (b) Régression linéaire. (s1) premier segment de régression linéaire. (s2) deuxième segment de régression linéaire

Une équation de la perte de rendement en fonction de l'AIDB a été ainsi établie en traçant la droite de régression linéaire (réduction du rdt (Y_{Lbio}) = f(AIDB) (figure 15) pour ajuster le nuage des points obtenu : $Y_{Lbio} = 0.38 + 0.003 \times AIDB$ ($R^2 = 0.29$, p-value = 8.10^{-12}) (Eq. 10)

Avant d'injecter l'équation dans le modèle, nous avons essayé d'améliorer la qualité de l'ajustement linéaire en adoptant une approche par classe. En effet, nous avons organisé nos valeurs d'AIDB en intervalles correspondant à 4 classes. Ces dernières reflètent des niveaux d'attaques globales des bioagresseurs (annexe 5) et nous avons représenté la réduction relative du rendement (Y_{Lbio}) en fonction de ces classes (figure 16a). Un test de Tukey a été ensuite réalisé pour permettre de différencier cette réduction du rendement selon 4 classes (annexe 6) et nous avons tracé 2 régressions linéaires passant par les moyennes des intervalles correspondantes à chaque classe, une première (s1) passant par la moyenne de réduction du rendement des trois premières classes (AIDB faible à élevé) et une deuxième (s2) passant par la moyenne de réduction du rendement des classes d'AIDB élevé et très élevé (figure 16b). Les équations de ces deux régressions ont été intégrées dans GrapePest :

Si $13 \leq AIDB < 63$: *perte de rdt* (y_{Lbio}) = $0.38 + 0.003 * AIDB$ ($R^2 = 0.32$, p-value = 0.00024) (Eq. 11)

Si $63 \leq AIDB \leq 100$: *perte de rdt* (y_{Lbio}) = $0.12 + 0.01 * AIDB$ ($R^2 = 0.2$, p-value = 0.04) (Eq. 12)

L'équation de perte obtenue est appliquée dans le modèle sur la biomasse des grappes simulée en absence de tout stress obtenue en fin de saison afin de re-calculer le rendement réel. Concernant les pertes de rendement dues aux dégâts sur feuilles, les sévérités des attaques engendrées par maladies des feuilles sont très faibles et nous n'avons pas donc traité cet aspect-là.

d. Pertes de rendement

La perte de rendement totale Y_L est calculée selon la formule : $Y_L = Y_{att} - Y_{ACT}$ (Eq. 13)
Où : - Y_{att} correspond à notre situation de production idéale en termes de masse sèche des grappes (au traitement idéal 80U-80%). Il est obtenu après simulation du rendement comme réalisé par Dagher (2014) ;

- Y_{ACT} correspond au rendement réel des autres traitements. C'est le rendement résultant après avoir tenu compte de la variation de BM, et des coefficients d'allocation et de répartition et de la réduction due aux bioagresseurs.

Après avoir atteint nos objectifs (cf E. 1.), il est pertinent de discuter nos résultats.

IV. Discussion

A. Discussion des méthodes

1. Démarche de conceptualisation et modèle conceptuel

La méthode de conceptualisation élaborée par Lamanda et al. (2012) est basée sur un protocole standardisé normalisé ce qui prouve la genericité de cette démarche et la validité de son application pour élaborer notre modèle conceptuel.

Afin de simplifier le modèle conceptuel, les flèches explicitant l'effet des contraintes hydrique et azotée sont dirigées de la fourniture hydrique/azotée vers le pool de de C, mais

comme nous l'avons explicité dans la partie résultats, l'effet est à la fois sur la croissance, le gain de C et sur les coefficients d'allocation/remobilisation du C.

2. Discussion de la qualité des données

a. Jeu de données abiotiques

La récolte des données a été réalisée lors des destructions à chaque stade clé ce qui signifie qu'on ne suit pas la même plante au cours de la saison. Ceci a engendré des biais lors des calculs des coefficients d'allocation de BM avec notamment des coefficients négatifs de répartition de la BM vers le compartiment des feuilles entre floraison et véraison. Ainsi, certains coefficients d'allocation de la BM, notamment vers compartiment pérenne et au stade floraison n'ont pas pu être obtenu de façon fiable à partir de l'approche expérimentale exploitée de TraDevi. Toutefois, l'expérimentation a été répétée cette année, et on espère affiner cette première analyse.

b. Jeu de données biotiques

Le jeu de données de suivis pathologiques de la vigne utilisé pour établir les formalismes à intégrer dans le modèle est issu d'une expérimentation « multipest » conçue pour établir la relation entre profils de bioagresseurs et pertes de rendement. Il est donc bien adapté à notre objectif initial. Les sévérités des maladies étaient notées en classes de pourcentage, car l'évaluation chiffrée précise du pourcentage de la surface atteinte des grappes est assez difficile, d'autant plus que plusieurs notateurs ont contribué à établir le jeu de données.

B. Discussion des résultats

1. Choix des formalismes : discussion des équations au sens biologique

a. Effet des contraintes hydriques et azotées

Les formalismes que nous avons développés ont été indiqués sur le modèle conceptuel, selon la significativité des résultats. Nous constatons à partir des résultats que l'eau et l'N tous les deux sur les processus mentionnés ci-après (flèches (1) et (2)).

Sur la production de C (flèche 1) :

D'après les résultats expérimentaux utilisés, l'N a un effet plus important que l'eau sur la production du C. Ceci peut être expliqué par le fait la contrainte azotée a été appliquée de façon plus précoce (dès le débourrement) que la contrainte hydrique (à partir de la nouaison). Il serait donc intéressant d'avoir des contraintes parfaitement simultanées afin d'évaluer leurs contributions relatives aux pertes de fonctionnement.

Le formalisme de réduction de production de C à floraison inclut l'effet de l'N mais aussi de l'eau. En effet, à floraison la vigne est en période de sensibilité au stress hydrique, il une action déterminante sur la production de BM par diminution de la surface assimilatrice de la plante caractérisée par l'indice foliaire (LAI) (Lebon et al., 2006). Un stress hydrique intense (observé chez le 0U-10%) peut réduire fortement la surface foliaire ce qui limite l'interception lumineuse et la production de carbohydrates avec des conséquences sur le transfert de ces synthétats aux grappes (Pellegrino et al., 2005). La fourniture azotée conditionne le statut azoté de la feuille (SPAD), qui joue un rôle important sur la croissance en C (croissance végétative annuelle) à récolte ce qui justifie le formalisme de variation de BM à ce stade phénologique

(Vrignon-Bernas et al., 2019). Il serait pertinent par la suite également de considérer les impacts de ces contraintes influencent sur les pertes de rendement de l'année suivante (Guilpart, 2014).

Sur le partitionnement de C (flèche 2) :

Les équations des coefficients d'allocation issues de l'analyse des données TraDevi ne montrent que l'effet de l'eau à véraison et à récolte (annexe 8) ; plus la quantité d'eau fournie à la plante est importante plus la valeur du coefficient (aux grappes et aux tiges) est élevée. Ceci coïncide avec les résultats de Eziz et al. (2015). Ils ont trouvé que l'allocation de C vers les organes reproducteurs est réduite significativement à cause du stress hydrique. En effet, les plantes ont également tendance à réduire les investissements en matière de reproduction, qui nécessitent de grandes quantités d'énergie et d'eau, en raison de la réduction de la photosynthèse et des modifications de la phénologie (période de croissance plus courte ou floraison précoce par exemple) en relation avec la sécheresse entraînent une réduction significative de l'allocation de biomasse aux organes reproducteurs (Eziz et al., 2015). Ceci est aussi valable pour les coefficients de répartition. En effet, nous avons essayé de retrouver aussi les coefficients de répartition à véraison et à récolte pour en déduire les formalismes comme indiqué dans le tableau 8 pour comparer les deux approches.

La perte importante de BM des pérennes indiquée dans les valeurs des coefficients d'allocation extraites de l'analyse des données entre débourrement et floraison peut être expliquée par le fait qu'à débourrement, les pots ont été saturés pour permettre le lessivage des reliquats azotés du sol, ce qui peut engendrer des nécroses au niveau des racines d'où la perte si importante de BM pérenne entre débourrement et floraison. Ceci reste intrinsèque et spécifique à notre expérimentation et ne représente pas ce qu'on attendrait au champ où les conditions de saturation en eau sont exceptionnelles. Selon Bates et al. (2002), la BM des racines pérennes reste stable entre ces deux stades et augmente à floraison. GrapePest ne nous donne pas donc une idée claire sur les différentes trajectoires du C synthétisé entre ces deux stades avec le paramétrage que nous avons adopté. Ceci nous incite à dire que vu cet artefact expérimental, nous pouvons pas calculer des coefficients d'allocation et que les coefficients que nous avons obtenus sont à prendre avec précautions ; ils ne sont valides que dans le contexte de notre dispositif.

Dans la littérature, on parle d'interaction entre l'N dans le sol et la croissance en C. En effet, on montre que l'apport en N modifie la croissance en C de la plante entière et sa répartition entre les parties annuelles et pérennes des plantes. La carence en azote ralentit la croissance et entraîne une allocation plus élevée de biomasse vers les parties pérennes de la plante (notamment le tronc) (Metay et al., 2015). Ceci est cohérent avec nos formalismes issus du calcul des coefficients de répartition, mais pas avec les coefficients d'allocation qui ne montrent pas d'effet d'N : Par rapport au traitement idéal, nous remarquons que chez la plante stressée le partitionnement de la BM vers les organes pérennes est plus important, et pour un même traitement hydrique, nous avons plus de BM dans les pérennes qu'on réduise la dose appliquée.

b. Effet des bioagresseurs

Notre objectif était d'introduire dans GrapePest un facteur de réduction du rendement. Pour cela, il était nécessaire de connaître le rendement maximal atteignable. Nous avons regroupé les ceps des différentes modalités pour estimer ce rendement maximal atteignable (y_{max}) cette année-là dans les conditions de la parcelle expérimentale. L'approche initialement envisagée était d'établir y_{max} en ne considérant que la modalité « Domaine ». En effet, elle représente théoriquement la stratégie majoritairement adoptée par les viticulteurs de la région,

et qui a pour objectif de protéger au mieux la vigne des bioagresseurs. Mais en 2013, la couverture phytosanitaire mise œuvre par les agents du domaine du Chapitre n'a pas été totalement réussie et finalement ce n'est pas dans cette modalité que les ceps ont été le mieux protégés. De ce fait, nous avons utilisé l'ensemble des modalités et une approche statistique pour établir y_{max} . Suivant cette méthode, nous avons calculé les pertes de rendement relatives pour chaque cep. Or nous observons des pertes de rendement relatives assez fortes pour certains ceps. Dans certains cas, ceci est observé pour des ceps où la valeur de l'AIDB est faible, voire nulle (dans la modalité « -50 » par exemple, la perte de rendement peut atteindre 70% avec des AIDB inférieurs à 10%). Cette perte de rendement relative ne peut pas, pour ces ceps, s'expliquer par l'action des bioagresseurs pris en compte dans l'AIDB. Dans ce cas, on peut faire l'hypothèse que le rendement potentiel était faible pour ces ceps : en effet, notre estimation de y_{max} ne prend pas en compte le potentiel individuel de chaque cep en début de saison, par exemple si un faible nombre de grappes a été initié l'année précédente. Il est possible aussi que la réduction du rendement soit due à d'autres phénomènes non pris en compte comme des maladies du bois.

Nous observons également dans certains cas des AIDB forts et tout de même des rendements non négligeables (figure 15), notamment dans le cas des témoins non traités. En effet, il est possible d'avoir dans ce cas une certaine quantité de grappes au moment de la récolte, mais que celles soient largement atteintes d'oïdium. Cela produit une récolte de mauvaise qualité, mais la variable rendement ne quantifie que la quantité vendangée, et l'aspect qualitatif n'est pas pris en compte dans cette analyse. Enfin, pour établir un lien statistique entre l'AIDB mesuré et la perte de rendement, nous avons structuré les valeurs d'AIDB en classes. Ce calcul permettait de limiter l'importance du chiffre brut de l'AIDB, mais plutôt de considérer des « situations phytosanitaires » de la vigne, ce qui est cohérent avec le fait que les sévérités elles-mêmes étaient mesurées par classe et que leur détermination contient une part de subjectivité.

Concernant les pertes de rendement dues aux attaques de bioagresseurs, la démarche adoptée pour GrapePest était de considérer en variable d'entrée les profils de bioagresseurs (sévérités d'attaques des maladies et nombre d'individus ou de foyers pour les ravageurs au cours du temps), comme il a été fait par Willocquet et Savary (2012). Une autre stratégie est développée dans certains modèles, qui consiste à considérer pour chaque bioagresseur un inoculum initial en début de saison et à modéliser sa dynamique en fonction notamment des paramètres climatiques (Leroy et al., 2013), ou de coupler le modèle à un des modèles de prévision de maladies comme il en existe (Calonnec et al., 2008). Elle conduit cependant à un effort de modélisation et de paramétrisation important pour chacun des bioagresseurs envisagés, sans pour autant intégrer les interactions entre ceux-ci. Pour cette raison, nous avons choisi de prendre en compte l'effet de l'ensemble des bioagresseurs via l'utilisation d'un indicateur synthétique des dommages sur grappes, l'AIDB (Fermaud et al, 2016), que nous avons relié à la perte de rendement engendrée grâce au jeu de données Damage. Cela permet la prise en compte globale des dommages compatible avec les objectifs et les contraintes de ce stage, mais présente l'inconvénient de ne pas être dynamique, et de s'appliquer brusquement en une fois sur le rendement une fois celui-ci établi.

C. Perspectives

Il est pertinent de passer par l'étape d'évaluation du modèle pour optimiser ses paramètres. L'adoption d'autres formalismes issus de la littérature scientifique pour améliorer le modèle peut être envisageable.

1. Effet des contraintes hydrique et azotée

Sur la production du C

L'effet du stress hydrique sur la croissance en biomasse peut être décrit comme dans le modèle Greenlab (Pallas et al., 2011) à partir de la dynamique de RUE avec l'état hydrique du sol définie par la fonction de Lebon et al., (2006) : $RUE(i) = \frac{1}{1+6,20e^{[-6,36(FTSW+0,14)]}} RUE_{max}$

Il est ainsi intéressant d'ajouter la fraction d'eau transpirable par le sol (FTSW) comme paramètre d'état et simuler son évolution au cours du temps. Il est aussi pertinent d'inclure dans GrapePest le statut azoté de la feuille et le relier aux effets des contraintes hydrique et azoté sur la production de C, d'où l'intérêt d'intégrer l'aspect allocation de l'N dans le modèle conceptuel qui permettra le calcul d'un bilan azoté de la plante.

Sur l'allocation du C

Selon la discussion de nos résultats, il paraît qu'avec nos données, il est plus intéressant d'intégrer dans GrapePest des coefficients de répartition plutôt que des coefficients d'allocation. Ceci permettra d'adapter plus facilement le modèle au champ.

La poursuite de ce travail sera d'essayer de relier état nutritionnel à élaboration composantes du rendement pour les contraintes abiotiques. On pourrait aussi imaginer intégrer effet contraintes biotiques directement sur les processus et analyser les interaction biotiques x abiotiques.

2. Effet des bioagresseurs

L'inconvénient de la non dynamique de l'AIDB pourrait être en partie pallié en établissant des relations entre chacune des deux parties de cet indicateur : les dégâts précoces d'une part (partie A) et les dégâts tardifs d'autre part (partie B). De plus, l'AIDB ne prend en compte que les dégâts sur grappes. Les attaques sur feuilles, notamment s'il y a une forte défoliation, peuvent avoir des effets importants non seulement sur le rendement mais également sur les possibilités de mise en réserve. Pour prendre en compte les effets annuels au moins, un nouvel indicateur est en cours de développement par les mêmes auteurs que l'AIDB (Fermaud et Smits, communication personnelle).

Enfin, une prise en compte plus précise des dégâts consisterait en l'application de la démarche proposée dans Wheatpest (Willoquet et al., 2008) qui prend en compte chaque bioagresseur et simule les processus qu'il perturbe. J'ai regroupé ces différents effets concernant les bioagresseurs qui concernent la vigne dans l'annexe 8 : Il existe dans la bibliographie des formalismes explicitant ces mécanismes de dommage et leurs effets sur le rendement, que nous pouvons envisager d'adapter et d'intégrer dans GrapePest.

3. Evaluation du modèle

L'étape d'évaluation du modèle est très importante dans la modélisation pour améliorer sa qualité. Il sera essentiel de confronter les sorties estimées par le modèle avec les données expérimentales (Wallash et al., 2006) et de réaliser une analyse de sensibilité. Les données Tradevi du lot 1 avec les BM des différents organes en fonction des traitements, est disponible pour cette étape indiquant. L'estimation des paramètres peut être améliorée en adoptant la méthode d'optimisation qui vise les écarts entre variables estimées et observées (Barbotin, 2004).

Conclusion

L'objectif de ce travail était d'intégrer dans un modèle préexistant de développement de la vigne des formalismes pour quantifier les effets des contraintes abiotiques (liées à l'eau et l'azote) et biotiques (liés à l'oïdium, au mildiou et aux tordeuses) sur les processus de production et d'allocation de carbone en pluriannuel. Ainsi, nous avons travaillé conjointement sur l'analyse statistique des données biotiques et abiotiques et sur la démarche de modélisation pour pouvoir proposer des formalismes.

Nous avons élaboré le modèle conceptuel en rajoutant à l'ancienne structure développée par Dagher (2014) le compartiment bioagresseurs comme entrée, le compartiment sol (profondeur exploitable par les racines) dans le système étudié qui permettra de montrer l'effet de la fourniture hydrique et azotée sur le rendement. Un paramétrage des équations des effets des traitements hydriques et azotés considérés a été proposé, selon la significativité des effets, sur les processus physiologiques de production et d'allocation de C (ou sa répartition) vers les organes annuels et pérennes. Le pool des pérennes que nous avons rajouté a pour intérêt de réaliser des simulations pluriannuelles. L'effet des bioagresseurs a été introduit grâce à un formalisme faisant paramétrer par l'indicateur AIDB synthétisant les sévérités des trois bioagresseurs considérés selon une équation. La variable de sortie est le rendement réel qui est calculé comme étant la différence entre un rendement atteignable en conditions idéales d'expérimentation et pertes de rendement en BM sèche des grappes. En perspective, il est intéressant d'améliorer le paramétrage des coefficients d'allocation et d'aller jusqu'à l'évaluation du modèle, et aussi d'atteindre une modélisation dynamique plus fine en terme biotique.

V. Bibliographie

- ALLEWELDT, G.**, 1963. Einfluss von klimafactoren auf die zahl der inflorescenzen bei reben. *Wein-Wess.* 18 : 61-70.
- ATTIA, Faouzi**, 2007. Effet du stress hydrique sur le comportement écophysioologique et la maturité phénologique de la vigne *Vitis vinifera* L. : étude de cinq cépages autochtones de Midi-Pyrénées. In : . 2007. p. 194.
- AUBERTOT, Jean-Noël**, 2008. Exemple 2 : The WheatPest model. In : [en ligne]. S.l. novembre 2008. Disponible à l'adresse : http://www.modelia.org/html/081118_ModellingCoursePoland/pdf/7_WHEATPEST_Aubertot_20081119.pdf.
- BINDI, M., MIGLIETTA, F., GOZZINI, B., ORLANDINI, S., et SEGHI, L.** (1997). A simple model for simulation of growth and development in grapevine (*Vitis vinifera* L .). I. Model description. *Vitis*, 36(2), 67-71.
- BRISSON, N, GARY, C, JUSTES, E, ROCHE, R, MARY, B, RIPOCHE, D, ZIMMER, D, SIERRA, J, BERTUZZI, P, BURGER, P, BUSSIÈRE, F, CABIDOCHÉ, Y. M, CELLIER, P, DEBAEKE, P, GAUDILLÈRE, J. P, HÉNAULT, C, MARAUX, F, SEGUIN, B et SINOQUET, H**, 2003. An overview of the crop model stics. In : *European Journal of Agronomy*. 1 janvier 2003. Vol. 18, n° 3, p. 309-332. DOI 10.1016/S1161-0301(02)00110-7.
- CAFFARRA, Amelia, RINALDI, Monica, ECCEL, Emanuele, ROSSI, Vittorio et PERTOT, Ilaria**, 2012. Modelling the impact of climate change on the interaction between grapevine and its pests and pathogens: European grapevine moth and powdery mildew. In : *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 15 février 2012. Vol. 148, p. 89- 101. DOI 10.1016/j.agee.2011.11.017.
- CALONNEC, A., CARTOLARO, P., NAULIN, J.-M., BAILEY, D. et LANGLAIS, M.**, 2008. A host-pathogen simulation model: powdery mildew of grapevine. In : *Plant Pathology*. 2008. Vol. 57, n° 3, p. 493 -508. DOI 10.1111/j.1365-3059.2007.01783.x.
- CARBONNEAU, Alain, DELOIRE, Alain, TERREGROSA, Laurent, JAILLARD, Benoît, PELLEGRINO, Anne, MÉTAY, Aurélie, OJEDA, Hernan, LEBON, Eric et ABBAL, Philippe**, 2015. *Traité de la vigne : Physiologie, Terroir, Culture*. 2ème édition. S.l. : s.n.
- CARMONA, M. J., CHAÏB, J., MARTÍNEZ-ZAPATER, J. M., and THOMAS, M. R.** 2008. A molecular genetic perspective of reproductive development in grapevine. *Journal of experimental botany*, 59(10) : 257996.
- CHAMBRE D'AGRICULTURE RÉGION ALSACE**, 2015. *Bulletin du santé du végétal-ECOPHYTO* [en ligne]. 15 juillet 2015. S.l. : s.n. Disponible à l'adresse : http://draaf.grand-est.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/13_VITI_Als_cle494b1a.pdf.
- CHAMPAGNOL, F.** (1984). *Eléments de physiologie de la vigne et de viticulture générale* (p. 351).
- CLAVERIE, M., AUDEGUIN, L., BARBEAU, G., BECCAVIN, I., DESPERRIER, JM., DUREUIL, J., ESMENJAUD, D., GOUTTESOULARD, M., JACQUET, O., KUNTZMANN, P., LAVEAU, C., LEY, L., LEYDET, F., LUSSON, A., MEJEAN, I. et OLLAT, N.**, 2016. *NEMADÉX AB : BILAN DES RÉSEAUX D'EXPÉRIMENTATION EN FRANCE*. mars 2016. S.l. : s.n.
- COOMBE, B. G.**, 1995. Growth Stages of the Grapevine: Adoption of a system for identifying grapevine growth stages. In : *Australian Journal of Grape and Wine Research*. 1995. Vol. 1, n° 2, p. 104-110. DOI 10.1111/j.1755-0238.1995.tb00086.x.
- Coombe, Bryan G., et M. G. McCarthy**. 2000. Dynamics of grape berry growth and physiology of ripening. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 6 (2): 131-35.
- COOPER, Monica L., VARELA, Lucia G. et SMITH, Rhonda J.**, 2010. *European Grapevine Moth: a New Pest of Grapes in California* [en ligne]. août 2010. S.l. : s.n. Disponible à l'adresse : <http://cesonoma.ucanr.edu/files/36671.pdf>.

- DAGHER, Amani**, 2014. *Adaptation d'un modèle de culture pour analyser les pertes de rendement en viticulture : faisabilité et recherche de paramètres*. Mémoire de fin d'étude. UMR System – INRA Montpellier.
- DELBAC, L., CONSTANT, N., LAVEAU, E., THIÉRY, D., SMITS, N., ROUDET, J., MÉROT, A., WERY, J. et FERMAUD, M.**, 2013. Un nouvel indicateur intégré d'évaluation des dégâts occasionnés aux grappes par des bioagresseurs majeurs au vignoble. In : *Innovations Agronomiques*. 2013. n° 32, p. 61-71.
- DONATELLI, M., MAGAREY, R. D., BREGAGLIO, S., WILLOCQUET, L., WHISH, J. P. M. et SAVARY, S.**, 2017. Modelling the impacts of pests and diseases on agricultural systems. In : *Agricultural Systems*. 1 juillet 2017. Vol. 155, p. 213-224. DOI 10.1016/j.agsy.2017.01.019.
- Dry, Peter R.** 2000. « Canopy management for fruitfulness ». *Australian Journal of Grape and Wine Research* 6 (2): 109-115.
- Dunn, Gregory M., et Stephen R. Martin.** 2007. « A functional association in *Vitis vinifera* L. cv. Cabernet Sauvignon between the extent of primary branching and the number of flowers formed per inflorescence ». *Australian Journal of Grape and Wine Research* 13 (2): 95-100.
- FILIPESCU, C, GEORGESCU, T et ALEXA, C**, 2005. BIOLOGICAL CONTROL OF THE SPECIES EUPOECILIA AMBIGUELLA HBN. IN PLANTATIONS FROM HUSI-VASLUI VINEYARD. In : . 2005. p. 5.
- FRANCE AGRIMER**, 2019. Fiche filière vin [en ligne]. janvier 2019. S.l. : s.n. Disponible à l'adresse : <http://www.franceagrimer.fr/filieres-Vin-et-cidre/Vin>.
- GARCIA DE CORTAZAR-ATAURI, Iñaki**, 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* [en ligne]. S.l. : s.n. [Consulté le 12 mars 2019]. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/277310897_Adaptation_du_Modele_STICS_a_la_Vigne_Vitis_vinifera_L_Utilisation_dans_le_Cadre_d'une_Etude_d'Impact_du_Changement_Climatique_a_l'Echelle_de_la_France.
- GOVERNMENT OF WEST AUSTRALIA**, 2018. Downy mildew of grapevines: Page 2 of 5. In : [en ligne]. 2018. [Consulté le 21 avril 2019]. Disponible à l'adresse : <https://www.agric.wa.gov.au/table-grapes/downy-mildew-grapevines?page=0%2C1>.
- GUILPART, N.** 2010. Etude du bilan d'azote d'une vigne enherbée. Quantification des flux et perspectives pour la modélisation. Montpellier SupAgro.
- GUILPART, Nicolas**, 2014. *Relations entre services écosystémiques dans un agroécosystème à base de plantes pérennes : compromis entre rendement de la vigne et régulation de l'oïdium*. S.l. : Montpellier SupAgro.
- GUILPART, Nicolas, METAY, Aurélie et GARY, Christian**, 2014. Grapevine bud fertility and number of berries per bunch are determined by water and nitrogen stress around flowering in the previous year. In : *European Journal of Agronomy*. 1 mars 2014. Vol. 54, p. 9-20. DOI 10.1016/j.eja.2013.11.002.
- HABIB, Robert et MONESTIEZ, Pascal**, 1987. Modélisation de la dynamique de répartition de l'azote chez un jeune arbre fruitier pendant la phase de croissance exponentielle. I. Etablissement du modèle. Estimation des paramètres. In : *Agronomie*. 1987. Vol. 7, n° 6, p. 401-408.
- HOLZAPFEL, B.P., J.P. SMITH, S.K. FIELD et W.J. HARDIE.** 2010. Dynamics of carbohydrate reserves in cultivated grapevines. *Hort. Rev.* 37:143-211.
- HOLZAPFEL, Bruno P. et SMITH, Jason P.**, 2012. Developmental Stage and Climatic Factors Impact More on Carbohydrate Reserve Dynamics of Shiraz than Cultural Practice. In : *American Journal of Enology and Viticulture*. 1 septembre 2012. Vol. 63, n° 3, p. 333-342. DOI 10.5344/ajev.2012.11071.
- IFV**, 2007. *LES MALADIES DU BOIS : UNE AFFAIRE TOUJOURS AUSSI COMPLE* [en ligne]. 19 janvier 2007. S.l. : s.n. [Consulté le 2 mars 2019]. Disponible à l'adresse : https://www.vinopole.com/uploads/tx_vinoexperimentation/2007_01_19_Article_Maladies_du_bois_AA.pdf.
- IFV**, 2015. *Les viroses de la vigne* [en ligne]. 2015. S.l. : s.n. [Consulté le 5 mars 2019]. Disponible à l'adresse : http://www.vignevin.com/fileadmin/users/ifv/2015_New_Site/AE2/Fichiers/Viroses_Vigne.pdf.

- IFV OCCITANIE**, [sans date]. Le phylloxera. In : [en ligne]. [Consulté le 4 mars 2019 a]. Disponible à l'adresse : <http://www.vignevin-occitanie.com/fiches-pratiques/le-phylloxera/>.
- IFV OCCITANIE**, [sans date]. L'eudemis. In : [en ligne]. [Consulté le 21 avril 2019 b]. Disponible à l'adresse : <http://www.vignevin-occitanie.com/fiches-pratiques/eudemis/>.
- INRA**, 2014. Filière Vigne et produits de la Vigne : Analyse des voies de progrès en agriculture conventionnelle. S.l.
- ITAB**, 2003. *La protection contre les vers de la grappe en viticulture biologique* [en ligne]. octobre 2003. S.l. : s.n. Disponible à l'adresse : http://www.itab.asso.fr/downloads/Fiches-techniques_viti/viti%20vers%20grappe.pdf.
- KELLER, M.** 2005. Deficit irrigation and vine mineral nutrition. *American Journal of Enology and Viticulture* 56 (3): 267-83.
- KELLER, Markus**, 2010a. *The science of grapevines : Anatomy and Physiology*. Irrigated Agriculture Research and Extension Center, Washington State University, Prosser, WA : s.n. ISBN 978-0-12-374881-2.
- KELLER, M.** 2010b. Managing grapevines to optimise fruit development in a challenging environment: a climate change primer for viticulturists. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 16 (s1): 56-69.
- LEBON, Eric, DUMAS, Vincent, PIERI, Philippe et SCHULTZ, Hans**, 2003. Modelling the seasonal dynamics of the soil water balance of vineyards. In : *Functional Plant Biology*. 1 janvier 2003. Vol. 30, p. 699 -710. DOI 10.1071/FP02222.
- LEBON, E., PELLEGRINO, A., LOUARN, G. et LECOEUR, J.** 2006. Branch development controls leaf area dynamics in grapevine (*Vitis vinifera*) growing in drying soil. *Annals of botany*, 98 (1), 175 – 85.
- LI, Anna**, 2017. *Mieux Contrôler les Fluctuations de Rendement grâce à une Meilleure Compréhension des Mécanismes d'Initiation et de Différenciation des Primordia Inflorescentiels du Bourgeon Latent de Vigne* [en ligne]. S.l. : s.n. Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01865825/document>.
- LORENZ, D. H., K. W. EICHHORN, H. BLEIHOLDER, R. KLOSE, U. MEIER et E. WEBER.** 1995. «Growth stages of the grapevine: phenological growth stages of the grapevine (*Vitis vinifera* L. ssp. *vinifera*)—codes and descriptions according to the extended BBCH scale†». *Australian Journal of Grape and Wine Research* 1 (2): 100-103.
- MAF BIOSECURITY NEW ZEALAND**, 2008. *Pest risk analysis for six moth species: lessons for the biosecurity system on managing hitchhiker organisms*. février 2008. S.l. : s.n.
- MENEGHETTI, S., GARDIMAN, M., et CALÒ, A.** 2006. Flower biology of grapevine. A review. *Advances in horticultural science*, 20(4) : 317325.
- MISSION FAM-CNIV BIPE**, 2016. Présentation du Plan national de lutte contre les dépérissements du vignoble [en ligne]. S.l. Disponible à l'adresse : https://www.plan-deperissement-vigne.fr/sites/default/files/BIPE_Plan_Deperissements_Rapport%20final.pdf.
- NABITY, P. D., HAUS, M. J., BERENBAUM, M. R. et DELUCIA, E. H.**, 2013. Leaf-galling phylloxera on grapes reprograms host metabolism and morphology. In : *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 8 octobre 2013. Vol. 110, n° 41, p. 16663-16668. DOI 10.1073/pnas.1220219110.
- NOGUEIRA JÚNIOR, Antonio F., AMORIM, Lilian, SAVARY, Serge et WILLOCQUET, Laetitia**, 2018. Modelling the dynamics of grapevine growth over years. In : *Ecological Modelling*. 10 février 2018. Vol. 369, p. 77-87. DOI 10.1016/j.ecolmodel.2017.12.016.
- OLLAT, NATHALIE, PARASKEVI DIAKOU-VERDIN, J. P. CARDE, FRANÇOIS BARRIEU, JEAN-PIERRE GAUDILLERE, et ANNICK MOING.** 2002. Grape berry development: a review . *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin (France)*. <http://agris.fao.org/agrissearch/search.do?recordID=FR2003000948>.
- PALLAS, B., CHRISTOPHE, A., COURNÈDE, P.-H., et LECOEUR, J.** 2009. Using a mathematical model to evaluate the trophic and non-trophic determinants of axis development in grapevine. *Functional Plant Biology*, 36(2) :156.
- PALLAS, B., CHRISTOPHE, A. & LECOEUR, J.** 2010. Are the common assimilate pool and trophic relationships appropriate for dealing with the observed plasticity of grapevine development? *Annals of botany*, 105 (2), 233–47.
- PLAN NATIONAL DÉPÉRISSEMENT DU VIGNOBLE**, 2017. TRADEVI : données générales

[en ligne]. 2017. S.l. : s.n. Disponible à l'adresse : <https://www.plan-deperissement-vigne.fr/sites/default/files/201709/Fiche%20projet%20Plan%20D%C3%A9p%C3%A9rissement%20Trade%20vi.pdf>.

PUTZ, Francis E., 1991. *The Biology of Vines*. S.l. : Cambridge University Press. ISBN 978-0-521-39250-1.

REYNIER, Alain, 2016. Physiologie de la vigne - PDF. In : [en ligne]. mars 2016. [Consulté le 26 février 2019]. Disponible à l'adresse : <https://docplayer.fr/20046392-Physiologie-de-la-vigne.html>.

RIOU, Christophe, AGOSTINI, Dominique, AIGRAIN, Patrick, BARTHE, Muriel, DES ROBERT, Marie-Laetitia, GERVAIS, Jean-Philippe, JOBARD, Etienne, LURTON, Luc, MONCOMBLE, Dominique et PRETET-LATASTE, Caroline, 2016. Action plan against declining vineyards: An innovative approach. In : *39th World Congress of Vine and Wine* [en ligne]. S.l. : s.n. 2016. [Consulté le 5 mars 2019]. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/309466134_Action_plan_against_declining_vineyards_An_innovative_approach.

RUMBOLZ, J. et GUBLER, W. D., 2005. Susceptibility of grapevine buds to infection by powdery mildew *Erysiphe necator*. In : *Plant Pathology*. 1 août 2005. Vol. 54, n° 4, p. 535-548. DOI 10.1111/j.1365-3059.2005.01212.x.

SALINARI, Francesca, GIOSUE, SIMONA, TUBIELLO, FRANCESCO NICOLA, RETTORI, ANDREA, ROSSI, VITTORIO, SPANNA, FEDERICO, ROSENZWEIG, CYNTHIA et LODOVICA GULLINO, MARIA, 2006. Downy mildew (*Plasmopara viticola*) epidemics on grapevine under climate change. In : *Global Change Biology*. mai 2006. n° 12, p. 1299-1307. DOI 10.1111/j.1365-2486.2006.01175.x.

SAVARY, Serge et WILLOCQUET, Laetitia, 2014. American Phytopathological Society : Simulation Modeling in Botanical Epidemiology and Crop Loss Analysis. In : *American Phytopathological Society* [en ligne]. 2014. [Consulté le 15 mars 2019]. Disponible à l'adresse : <https://www.apsnet.org/pages/default.aspx>.

SEGUIN, B. 2007. Le réchauffement climatique et ses conséquences pour la viticulture. In Communication au colloque Réchauffement climatique, quels impacts probables sur les vignobles. Disponible sur l'adresse : http://chaireunesco-viniculture.ubourgogne.fr/colloques/actes_clima/Actes/Article_Pdf/Seguin.pdf.

SMITS, Nathalie, FERMAUD, Marc et DELBAC, Lionel, 2015. Projet SMACh – DAMAGE : Grapevine Yield Loss Pertes de récolte dues aux bioagresseurs en viticulture. In : [en ligne]. S.l. 1 septembre 2015. Disponible à l'adresse : <https://inra-dam-front-resources-cdn.brainsonic.com/ressources/afile/300733-5a1da-resource-qmpv-smach-smits.html>.

THIÉRY, Denis et DELBAC, Lionel, 2015. Eudémis et cochylis : du neuf sur ces ravageurs ancestraux. In : . 2015. p. 7.

VASCONCELOS, M., GREVEN, M., WINEELD, C., TROUGHT, M., et RAW, V. (2009). The overing process of *Vitis vinifera* : a review. *American Journal of Enology and Viticulture*, 60(4) : 411-434.

ZAPATA, C., DELEENS, E., CHAILLOU, S., & MAGNE, C. (2004). Partitioning and mobilization of starch and N reserves in grapevine (*Vitis vinifera* L.). *Journal of plant physiology*, 161(9), 1031-40.

Références webographiques

Agro-BASF. https://www.agro.basf.fr/fr/cultures/vigne/maladies_de_la_vigne/

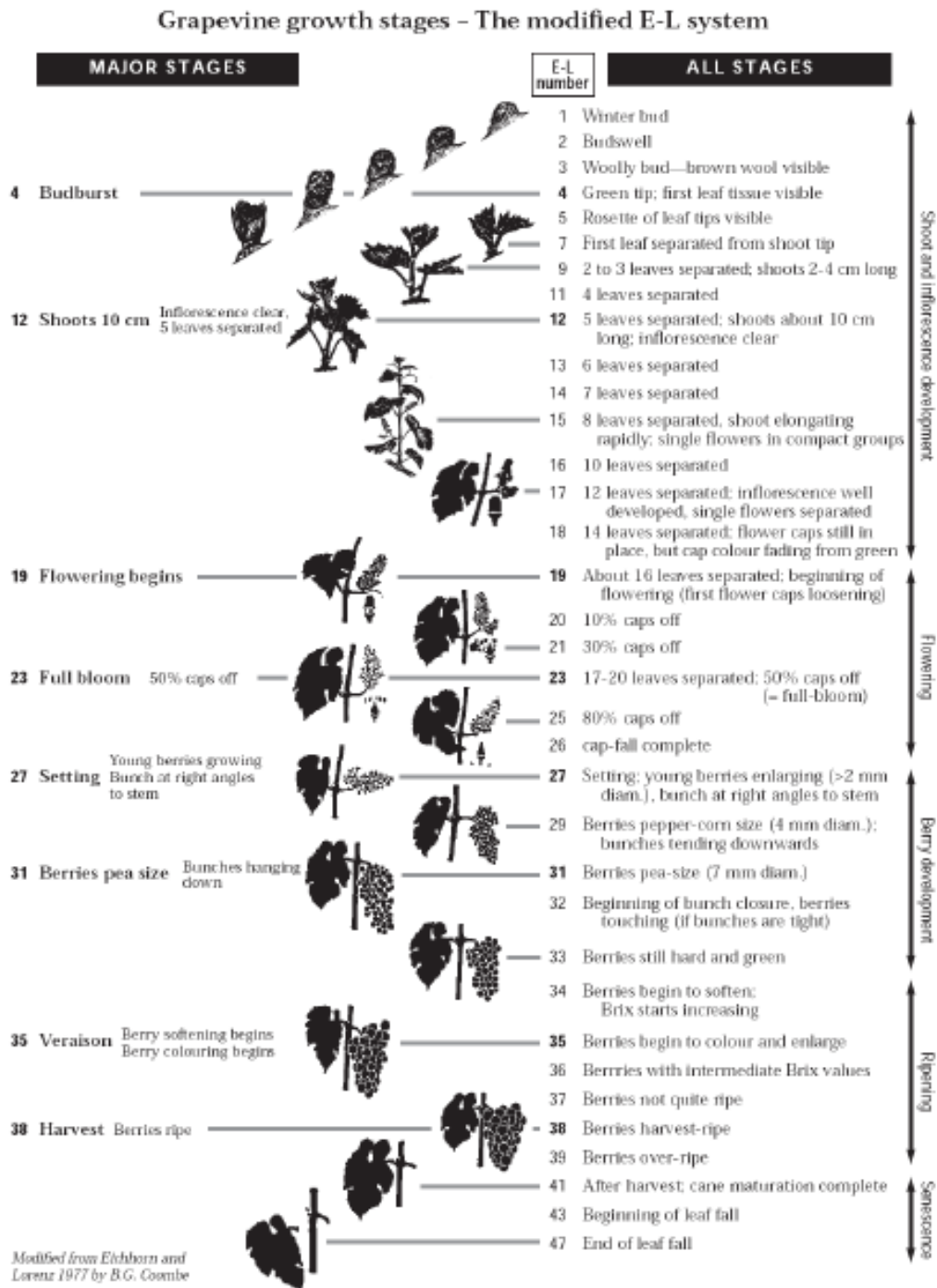
Ephytia ^a. <http://ephytia.inra.fr/fr/C/6084/Vigne-Phylloxera-Daktulosphaira-vitifoliae>

Ephytia ^b. <http://ephytia.inra.fr/fr/C/6094/Vigne-Mildiou-Plasmopara-viticola>

Ephytia ^c. http://ephytia.inra.fr/fr/C/6091/Vigne-Oidium-Erysiphe-necator?fbclid=IwAR0BzhCo4BrpNXj655eDy6FD5x7cewJce7isLWJgGo_qs7pexWJMtQxGwQ

IFV. Flavescence dorée. Disponible sur l'adresse : <http://www.vignevin.com/recherche/deperissements/flavescence-doree/flavescence-doree/principaux-enjeux.html>

IFV. 2015. Principales viroses. Disponible sur l'adresse :
<http://www.vignevin.com/recherche/deperissements/principales-viroses.html>
Francetvinfo. 2018. "Un dépérissement généralisé de tous les vignobles français" menace fortement la production de vin. Disponible sur l'adresse :
https://www.francetvinfo.fr/economie/emploi/metiers/agriculture/un-deperissement-generalise-de-tous-les-vignobles-francais-menace-fortement-la-production-de-vin_2811139.html



Annexe 1 : Stades phénologiques de la vigne selon l'échelle d'Eichhorn et Lorenz, modifiée par Coombe (1995).

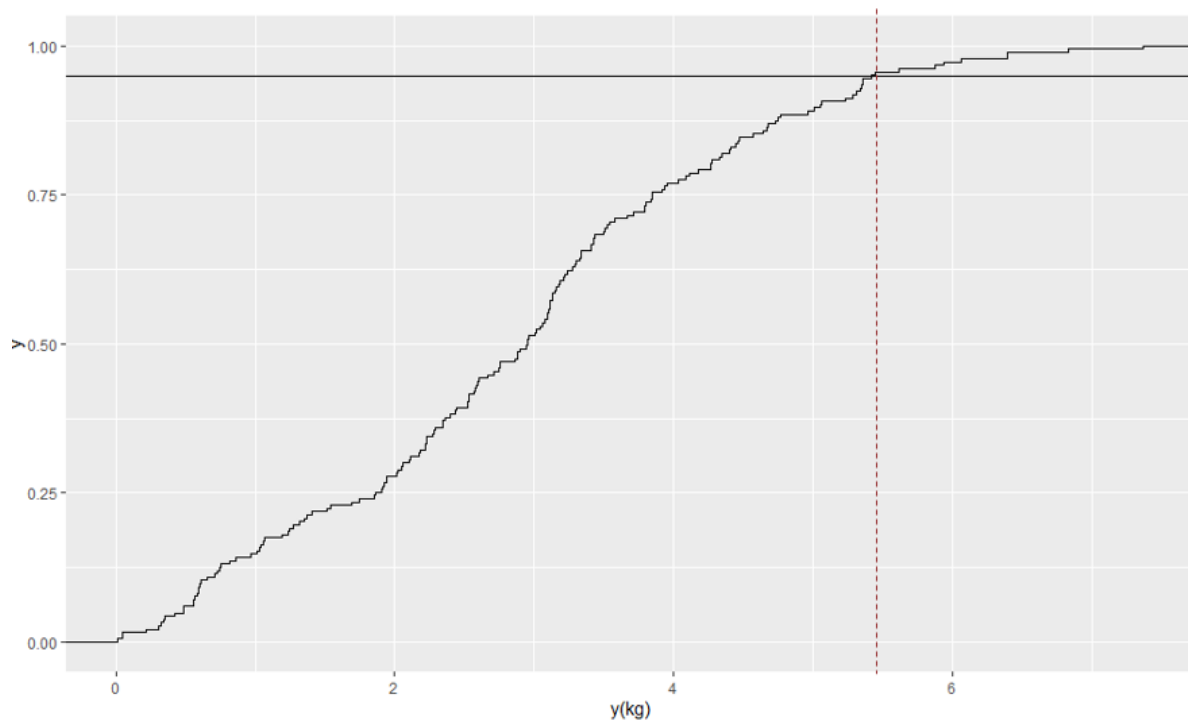
Annexe 2 : Tableaux
résumant les
formalismes et les
paramètres du modèle
pré-existant GrapePest

Processus	Formalisme	Description	Source
Production de biomasse	$RG = PAR \times RUE_{max} \times (1 - e^{-k \cdot LAI})$	Le RG représente le taux journalier d'accumulation de biomasse produite par photosynthèse, calculé grâce au modèle de Monteith et des lois de Beer , exprimé en $g \cdot m^{-2} \cdot j^{-1}$. PAR ($MJ \cdot m^{-2} \cdot j^{-1}$) ; RUE_{max} l'efficacité maximale de conversion du rayonnement intercepté en biomasse ($g \cdot MJ^{-1}$) ; k le coefficient d'extinction de la lumière (sans unité); LAI l'indice de surface foliaire ($m^2 \cdot m^{-2}$).	Monteith, 1977
Partition de la biomasse	$CBM_i = RG \times CP_i$ $CPS = 1 - CPL - CPC$ $CP_i = a / (1 + c \times e^{(-b \times SDJ)})$	CPS, CPL et CPC représentent respectivement les coefficients de partitionnement vers les rameaux, les feuilles et les grappes. Nous avons donc choisi de rechercher les dynamiques de CPL et CPC, pour en déduire ensuite celle de CPS. CP_i est le coefficient de partitionnement vers l'organe i (i : C ou i : L), a, b et c sont des paramètres à ajuster, et SDJ est le temps thermique depuis le débourrement.	Gutierrez et al., 1985 ; Nendel et al., 2004 ; Wermelinger et al., 1990
Elaboration du rendement	$Y = CLBM \times IC$	Le rendement de la vigne Y est la biomasse des baies qui est estimée à partir de la biomasse de grappes (CLBM) à maturité. IC est l'indice de récolte défini comme la fraction de la biomasse des fruits qui constitue effectivement la récolte commercialisable (Willoquet et al., 2008).	Willoquet et al., 2008

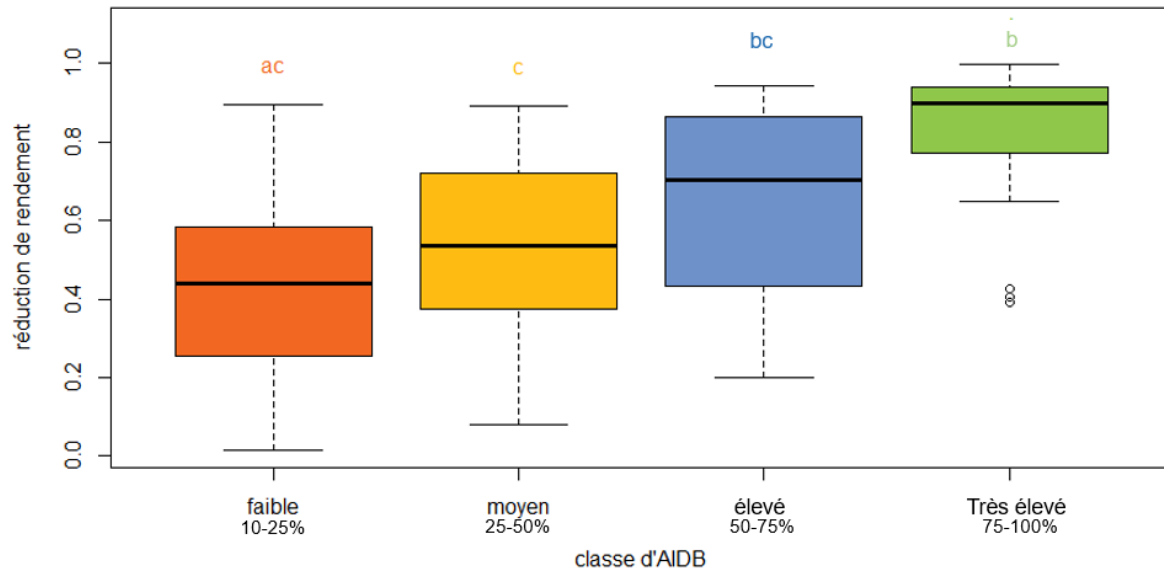
Paramètre	Valeur/Formalisme	Description	Source
Coefficient d'extinction	k=0.5	Ce coefficient est considéré constant dans le modèle	Celette, 2007
Efficacité biologique	$RUE_{max} = 5.68e^{-9}SDJ^3 + 1.003e^{-5}SDJ^2 + 0.004SDJ + 0.344$	Il s'agit de l'efficacité de conversion de rayonnement quand la vigne ne subit aucun stress abiotique	
Coefficient de partition de biomasse (pour feuilles et grappes)	$CPL = 0.56 / (1 + 0.0028 e^{0.0059 \times SDJ})$ $CPC = 0.96 / (1 + 106.2 e^{-0.005 \times SDJ})$		
Indice foliaire	$LAI = LFBM \times SLA$ $SLA = u \times (1 - e^{(-v \times SDJ)}) - a \times (e^{(-b \times SDJ)})$	LFBM est exprimée en $g \cdot m^{-2}$ et SLA en $m^2 \cdot g^{-1}$. Les paramètres de la fonction de SLA ont été estimés par la méthode d'optimisation à partir des données de SLA de Florian Celette (2004-2006).	Celette, 2007

Annexe 3 : Tableau des résultats de l'ANOVA sur les composantes du rendement à récolte pour différencier le traitement optimal. (a) matière sèche des grappes. (b) matière sèche des baies

Indicateur de rendement				
Récolte				
Cluster dry weight (g)				
Azote	0%	eau 30%	80%	Total azote
0U	8.38 ± 1.18	69.35 ± 31.38	60.26 ± 28.41	10.21 ± 2.66 a
80U	12.75 ± 1.71	89.19 ± 5.14	66.28 ± 8.66	79.54 ± 23.07 c
160U	9.67 ± 2.84	80.07 ± 23.03	44.70 ± 16.48	57.08 ± 20.12 b
Total eau	49.42 ± 35.34	60.02 ± 32.52	16.48 ± 34.1	



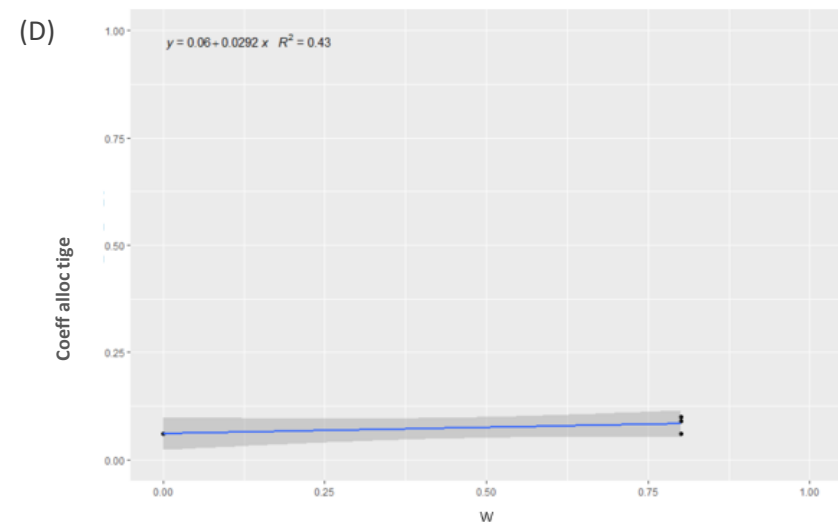
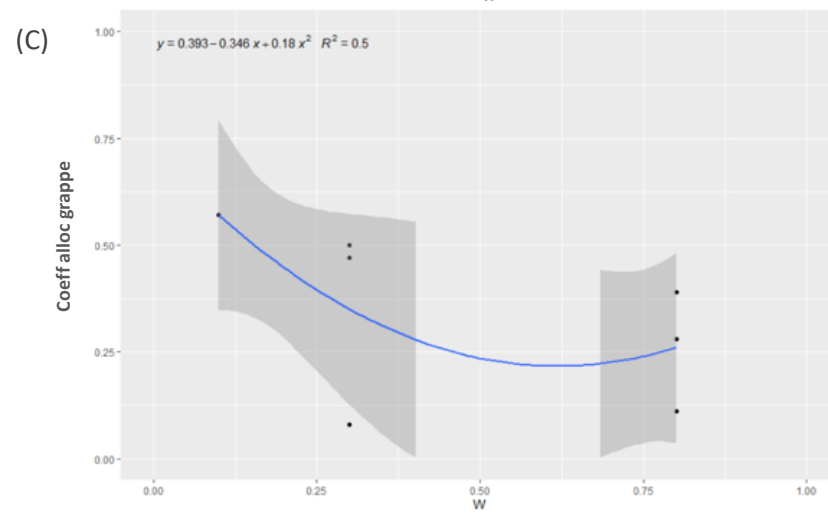
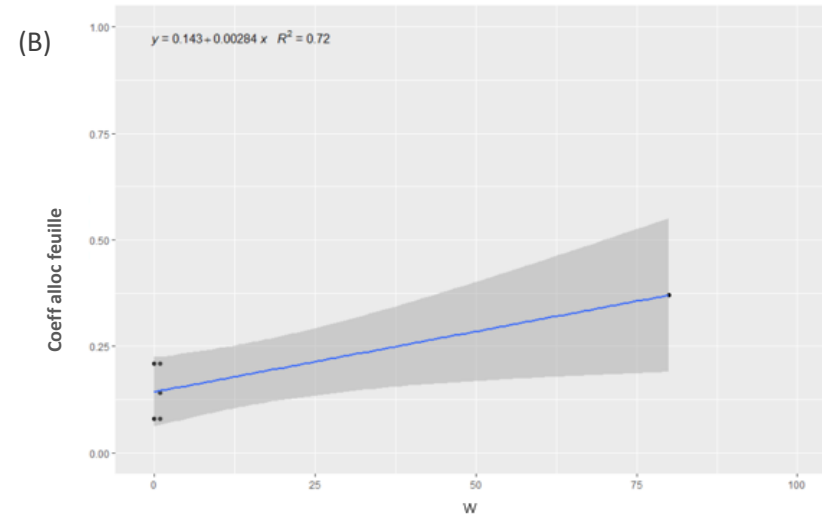
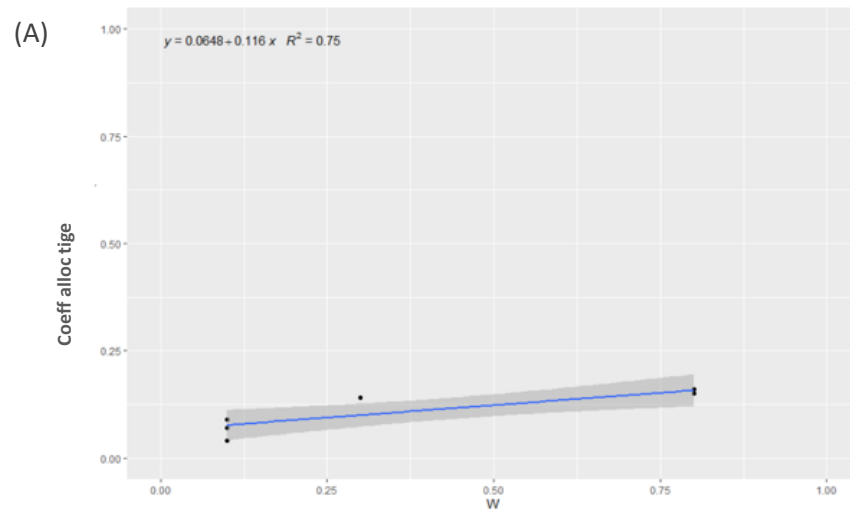
Annexe 4 : choix du rendement maximal Y_{max}



Annexe 5 : Boxplots avec les résultats du test de Tukey pour différencier la réduction du rendement entre classes d'AIDB

Annexe 6 : Définition des classes d'AIDB

Intervalle d'AIDB	Classe d'AIDB correspondante
]0-25[Faible
[25-50[Moyen
[50-75[Elevé
[75-100[Très élevé



Annexe 7 : Ajustement des paramètres des équations d'allocation de C. (A) allocation vers les tiges entre floraison et véraison. (B) allocation vers les feuilles entre véraison et récolte. (C) allocation vers les grappes entre floraison et véraison. (D) allocation vers les tiges entre véraison et récolte

Maladie	Mécanisme de dommage	Effet physiologique	Effet dans GrapePest	Stade d'attaque
Oïdium	Compétition vis-à-vis de la lumière : lésions	Réduction de l'interception lumineuse	Diminution du LAI	Autour de la floraison et à la fermeture des grappes
	Attaque des inflorescences et des jeunes baies	Mauvaise fructification	Diminution du poids de la baie	
Mildiou	Compétition vis-à-vis de la lumière : taches	Diminution de l'interception lumineuse	Diminution du poids de la baie et réduction de la biomasse des baies	A la floraison jusqu'à la fermeture des grappes
	Attaque des inflorescences et des baies	Mauvaise fructification et réduction des sucres au niveau de la baie		
Tordeuses	Attaque des boutons floraux et des baies	Destruction des inflorescences et des baies	Réduction du nombre des baies par grappe	Autour de la floraison et pendant toute la période de fructification

Annexe 8 : mécanismes de dommage des bioagresseurs au sens de WheatPest (Willoquet et al., 2008)



Diplôme : Ingénieur Agronome
Spécialité : Sciences et Ingénierie du Végétal
Spécialisation / option : Agrosystèmes : Conception et Evaluation
Enseignant référent : Edith LECADRE

Auteur : Amira NAJJAR

Date de naissance* : 11/07/1994

Nb pages : 28 Annexe(s) : 8

Année de soutenance : 2019

Organisme d'accueil : INRA de Montpellier

Adresse : 2 place Viala 34060 Montpellier

Maître de stage : Nathalie SMITS et Anne PELLEGRINO

Titre français : Développement conceptuel et mathématique d'un modèle de rendement de la vigne intégrant les contraintes biotiques et abiotiques

Titre anglais : Conceptual and mathematical development of a vine yield model integrating biotic and abiotic constraints

Résumé (1600 caractères maximum) : Dans le cadre du projet TraDevi, on cherche à approfondir et synthétiser les connaissances sur le dépérissement de la vigne qui est un phénomène plurifactoriel. Les contraintes biotiques et abiotiques sont parmi les facteurs favorisant ce phénomène. Nous cherchons ainsi à améliorer un modèle préexistant « GrapePest » (*Dagher, 2014*) de développement de la vigne : Comment y intégrer les effets des contraintes hydriques et azotées et les effets des bioagresseurs les plus dévastateurs de la vigne (mildiou, oïdium, tordeuse) pour simuler les pertes du rendement à l'échelle d'un cep sur un pas de temps pluriannuel ? A partir de l'analyse statistique réalisée sur nos données biotiques et abiotiques et en suivant une démarche de modélisation, nous avons développé des formalismes qui simulent l'effet de l'eau et de l'azote sur la production et l'allocation ou la répartition du carbone vers les différents organes (annuels et pérennes) et donc sur le rendement. L'effet des bioagresseurs est introduit dans le modèle comme fonction de l'AIDB qui est un indicateur synthétique des sévérités (*Fermaud et al., 2016*). Le rendement réel en biomasse sèche des grappes est calculé comme étant la différence entre rendement atteignable dans les conditions idéales de notre expérimentation et pertes due aux facteurs biotiques et abiotiques considérés. GrapePest présente des limites vis à vis du calcul des coefficients d'allocation vu que les données ne le permettent pas mais ce travail reste une première tentative pour intégrer l'effet des stress subit par la culture de vigne. Une étape d'évaluation du modèle est nécessaire pour le valider et l'extrapoler au champ.

Abstract (1600 caractères maximum) : Within the framework of the TraDevi project, the aim is to deepen and synthesize knowledge on the decline of the vine, which is a multi-factorial phenomenon. Biotic and abiotic constraints are among the factors that contribute to this phenomenon. We are thus seeking to improve a pre-existing "GrapePest" (*Dagher, 2014*) model of vine development: How to integrate the effects of water and nitrogen constraints and the effects of the most devastating vine pests (downy mildew, powdery mildew, budworm) to simulate yield losses at the vine stock level over a multi-year period? Based on the statistical analysis carried out on biotic and abiotic data and following a modelling approach, we have developed formalisms that simulate the effect of water and nitrogen on the production and allocation or distribution of carbon to the various organs (annual and perennial) and therefore on yield. The effect of pests and diseases is introduced into the model as a function of the AIDB, which is a synthetic indicator of severity (*Fermaud et al., 2016*). The actual dry biomass yield of the bunches is calculated as the difference between the yield achievable under the ideal conditions of our experiment and the losses due to the biotic and abiotic factors considered. GrapePest has limitations with regard to the calculation of allocation coefficients since the data do not allow it, but this work remains a first attempt to integrate the effect of the stresses suffered by vine growing. A model evaluation step is required to validate and extrapolate the model in the field.

Mots-clés : conceptualisation, modélisation mathématique, perte de rendement, contrainte hydrique, contrainte azotée, AIDB

Key Words: conceptualization, mathematical modeling, yield loss, water stress, nitrogen stress, AIDB