



HAL
open science

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

I. García de Cortázar-Atauri

► To cite this version:

I. García de Cortázar-Atauri. 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. Agronomie. ENSA, 2006. Français. NNT : 2006ENSA0030 . tel-04262126

HAL Id: tel-04262126

<https://hal.inrae.fr/tel-04262126>

Submitted on 27 Oct 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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - ShareAlike 4.0 International License

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE DE MONTPELLIER

THESE

Présentée pour obtenir le grade de :

**DOCTEUR DE L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE DE
MONTPELLIER**

*Ecole doctorale: Biologie des Systèmes Intègres – Agronomie – Environnement
Formation doctorale : Sciences du sol*

**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.**

Par

Iñaki GARCIA DE CORTAZAR ATAURI

Soutenue le 22 décembre 2006 devant le jury composé de :

J. WERY	Professeur ENSA-Montpellier	Président
H.R. SCHULTZ	Professeur, Université de Wiesbaden-Geisenheim	Rapporteur
K. VAN LEEUWEN	Professeur ENITA-Bordeaux	Rapporteur
L. TERRAY	Directeur de Recherche, CERFACS – Toulouse	Examineur
T. COULON	Directeur Section Agronomie, ITV-France- Bordeaux	Examineur
N. BRISSON	Directeur de Recherches, INRA – Avignon	Directeur de thèse

*"Toujours plus de complexité :
et donc encore plus de conscience"*

Teilhard de Chardin, *Le phénomène humain*

*"La météo c'est ce à quoi on s'attend,
le climat c'est ce que nous obtenons."*

Robert A. Heinlein, *Time enough for love*

Remerciements

Kaixo (salut en basque),

Le premier pas est déjà fait : ouvrir la thèse. Donc, le plus important et le plus difficile pour certains d'entre vous.

Aujourd'hui avec les versions électroniques de ce type de documents, on ne lit plus les documents complètement. On fait une recherche de quelques mots importants pour notre travail (CTRL+F) et à partir de cela on a déjà "lu" la thèse.

Il est donc important de ne pas rater l'opportunité d'attirer votre attention pendant quelques pages et de vous faire lire la seule partie de la thèse qui peut vous intéresser de manière générale : les remerciements.

Comme il est dit dans plusieurs remerciements de plusieurs thèses : c'est la première partie que l'on trouve dans le document, mais c'est la dernière partie que l'on écrit.

Donc c'est parti...

Mes premiers mots de remerciements sont pour Nadine Brisson, la directrice de cette thèse. La mia mamma. Merci Nadine, d'avoir pu vivre cette expérience à ton côté. Merci pour la confiance et la liberté que tu m'as accordée, pour ton soutien dans les mauvais moments, ta disponibilité, ta patience, tes conseils et ton savoir que tu as toujours voulu partager, pour t'être préoccupé de mon avenir et m'avoir permis de travailler dans un cadre incroyable. Merci encore. J'espère que mon chemin me permettra de revenir de temps en temps pour que l'on puisse continuer à partager de si bons moments.

Je tiens à remercier à Hans R. Schultz et K. Van Leeuwen de m'avoir fait l'honneur d'être les rapporteurs de cette thèse. Merci beaucoup de votre disponibilité et du travail minutieux accompli par vos corrections et critiques qui m'ont tellement aidé à la correction du manuscrit. Je n'oublie pas non plus les autres membres du jury: Laurent Terray, Jacques Wery et Thierry Coulon qui ont accepté d'examiner et de débattre de ce travail. Merci beaucoup.

Un grand nombre de personnes ont participé de manière très active, non seulement à l'élaboration de cette thèse, mais aussi à ma formation comme chercheur, ingénieur, thésard, et encore plus importante, comme personne.

Je voudrais donc remercier mes INRAnians :

Merci à Bernard Seguin, je suis content d'avoir pu partager ces années avec toi, pour tes histoires, pour tes blagues (je n'ai pas oublié...), pour ton soutien, ta confiance, les voyages, tes exposés en anglais et en français... merci beaucoup.

Merci à Marie Launay et à Dominique Ripoché, mes esticssettes. Merci de votre aide, de votre soutien, d'avoir fait le taxi pendant des années, de votre disponibilité, de votre conseil, de m'avoir laissé être votre pire cauchemar, ... de votre amitié, quoi!!!. Dans cette petite phrase, je dois ajouter la famille Launay (Bruno, Pierre et Elias) et M Bosseno (alias Rolando). Merci pour les soirées passées ensemble, pour la pacha-mama, pour ta confiance (merci Roland) et pour votre soutien pendant ces belles années.

Merci aux copains que j'ai rencontré à l'INRA pendant ces années:

Merci à David et Claire, je vous dois énormément, c'est un peu grâce à vous que j'en suis arrivé là, et ce n'est pas facile à mesurer. Je suis heureux de vous avoir rencontrés et d'avoir pu partager tellement de bons moments ensemble.

Gracias a Carlos Di Bella (Carlangas), mi hermano querido, ya sabes lo que pienso de vos y lo que me alegro que nos hayamos encontrado. Como te dije, en cierta medida es un poco culpa tuya que

me haya metido en este lio de la investigacion, asi que gracias. Y no me olvido que detras de un gran hombre hay siempre una gran familia, asi que muchas gracias a Marcela, Agostina y Francesco (el nuevo).

Merci à la bande d'anciens (et oui...): Vianney, Jérôme, Vincent, Marjorie, Sophie, Mohamed, Kathy, Cedric, Nadia, Kwatar, Boris, Gaël, Nacho, Stéphanie, Philippe, Seb, Raul, ... et à la bande de nouveaux (petits jeunes...): Samuel, David(s), Sylvain(s), Erwan, los Raules, Anne Isabelle, Claire, Elena et Isabel... Merci à tous pour tous les moments que nous avons partagés ensemble (bureau, pauses, cafés, bières ou vins...). Je suis content que nos chemins se soient croisés.

Merci aussi à tout le personnel des unités CSE et Agroclim. Merci à Martine, Fred, André, Albert, Françoise, Dominique, Marie Weiss pour vos conseils, aide et disponibilité à chacune de mes demandes, merci de m'avoir aidé dans ma formation de bébé-chercheur; à Nadine et Véronique pour votre aide, compagnie, sympathie et courage pour les longues manip sur le terrain et au laboratoire, merci car j'ai beaucoup appris avec vous (le français par exemple, même si j'ai toujours des problèmes à prononcer certains mots...); merci à Odile et Roselyne pour votre aide, patience, disponibilité, efficacité pendant toutes ces années, ce fût un vraie plaisir de vous rencontrer; merci à Philippe, Patrice et les SOSI qui ont toujours été là pour les problèmes informatiques, pour des bons conseils pour l'organisation de la méta-donnée, ou pour doper les « bécane »...; et un merci énorme au reste de l'unité avec laquelle j'ai co-habité: Jean François, Olivier, Fred Huard, Bernard Baculat, Daniel, Jacques et Jacqueline, Rodrigo (et Claude), Yves, Claude, Chantal, Carine, Dalila, Bernard Bes, le bâtiment SOL. Ce fût un vrai plaisir de profiter de votre compagnie pendant toutes ces années. Merci encore.

Je n'oublie pas certaines personnes qui même s'elles ne font pas partie de mon labo, appartiennent au groupe INRA. Merci à Jérôme Guerif (el Sr. Presidente) pour ta sympathie, accessibilité, accueil, générosité, bonne humeur. Je suis très content que nos chemins se soient rencontrés. Merci à Hugues Leiser, Thomas Nesme, les thésards de PSH, Denis Allard, Rachid Senoussi. Merci à toutes les personnes (chercheurs, thésards, techniciens, ingénieurs, stagiaires...) que j'ai rencontré dans le cadre des séminaires STICS (Caroline, Bruno, Pascal, Jean Louis, Eric, Robert, Natalia, Jose Ramon, Pascale), merci pour votre sympathie et pour donner une touche tellement familiale à ces rencontres.

Donc, là, je suis arrivé au tiers de mes remerciements.

Maintenant la partie viticole.

Comme beaucoup d'entre vous le savent, quand je suis arrivé dans cette histoire je ne connaissais rien à la vigne. Ainsi, j'ai quelques professeurs qui m'ont beaucoup aidé à me former et à connaître cette belle plante.

Je remercie donc d'une manière spéciale Olivier Jacquet, pour ton aide, pour ta disponibilité, ta franchise, ta confiance, pour m'avoir transmis tes connaissances et ton savoir faire. Merci Olivier pour ces quatre années que nous avons partagé ensemble, pour toutes ces heures de manip, de discussions sur le gonflement des baies, sur la viticulture en générale, sur le monde, sur ton cher Ventoux. Merci d'avoir été curieux et d'avoir voulu partager avec moi ton savoir. Merci beaucoup.

Je remercie aussi d'une manière spéciale Jean Christophe Payan. Merci beaucoup pour ton aide, ta disponibilité, ta passion dans ton travail (les baies, le chauffage, le trampoline...), pour les discussions que nous avons eues, pour avoir eu confiance en moi, pour toutes les choses que tu m'as apprises... pour ton amitié. Je suis content que nous ayons pu nous rencontrer. J'espère que nos chemins se recroiseront plein de fois.

Je n'oublie pas non plus le troisième formateur de cette histoire: Jean Pierre Gaudillere. Merci Jean Pierre pour ta sympathie, pour ta disponibilité, ton accessibilité, pour toutes les discussions que nous avons pu avoir et avec lesquelles j'ai tellement appris, pour ton regard critique mais

constructif. Merci et j'espère que tu pourras profiter de la nouvelle vie que tu commences avec tes orchidées. Merci encore.

Mais ne pensez pas que c'est fini, car il faut rappeler que pendant ces trois années je suis partie plusieurs fois en voyage dans différentes régions, pour les expérimentations, et à chaque fois j'ai toujours été bien accueilli.

Donc je commence mon tour de France des remerciements.

Je commence par la région des Côtes du Rhône. Je voudrais remercier très spécialement toute l'équipe de viticulture de la Chambre d'Agriculture 84 qui m'ont tellement aidé et appris pendant ces années de thèse. Un grand merci à Martine, Silvère, Florian, François, Anne Marie, Elodie, Christian. Sans vous ce travail n'aurait pas pu être possible. Merci aussi aux membres du S.G.V.R.C.D.R. pour leur aide avec les données historiques. Un gracias muy grande a Begoña por tu disponibilidad y tu alegría gallega con la que me he reido tanto, muchas gracias por todo. Merci à Christian et à Biljana pour votre aide avec les données et votre disponibilité. Merci à toute l'équipe du CIRAME et en spécialement à Jean Pierre Ramel (merci beaucoup pour tout), à Anne Marie, Maud, Yvan. Merci aussi à l'équipe technique de la parcelle de Serres du Lycée Agricole: merci à Myriam, Jean et Virginie, pour leur disponibilité pour pouvoir travailler sur leur parcelle. Je tiens à remercier aussi Marion Claverie par ta disponibilité, ta sympathie, pour les discussions sur les modèles, sur la qualité, la surface foliaire, pendant lesquelles j'ai beaucoup appris. Je suis content de t'avoir rencontré. Je tiens finalement à remercier les autres personnes de l'Institut Rhodanien et en particulier à Christophe Riou qui m'a toujours transmis son intérêt et sa disponibilité pendant ce travail.

On monte un peu au Nord et on arrive en Bourgogne. Je tiens à remercier à Jean Claude Fournioux de m'avoir ouvert les portes de l'Institut Jules Guyot. Merci pour ta disponibilité et ton intérêt pour mon sujet et pour l'encadrement de différents étudiants, surtout avec la surcharge de travail, de m'avoir invité à participer aux séminaires et d'avoir mis à notre disposition les différents laboratoires de l'institut pour pouvoir réaliser les expérimentations nécessaires. Merci à Sylvain Debord pour m'avoir aidé dans la prospection des parcelles. Merci à l'équipe de l'institut pour m'avoir toujours bien accueilli pendant mes séjours à Dijon. Merci aux stagiaires qui ont participé aux mesures et aux expérimentations: Fabien et Romain, Guillaume, Baptiste et Juliane. Merci de votre intérêt et de votre travail. Sans vous il n'aurait pas été possible de réaliser cette thèse. Je tiens à remercier aussi de manière spéciale Christine Monamy du BIVB pour son aide et sa disponibilité, pour nous avoir prêté la parcelle du Mont Battois et pour la recherche de données historiques la concernant. Merci Christine.

Si l'on continue vers le nord, on arrive en Champagne. Ici, je tiens à remercier le CIVC. Je voudrais remercier de manière spéciale Xavier Delpuelch pour ta disponibilité et ton travail, ainsi que par ton accueil pendant la première année de thèse. Ton aide sur le développement de la vigne a été très utile dans ce travail. J'étais très content de t'avoir revu lors de la soutenance de thèse et j'espère que nos chemins se recroiseront. Merci. Je veux aussi remercier de manière très particulière Damien Lesueur. Merci Damien de m'avoir transmis ta passion pour le champagne, pour ton travail, ta disponibilité, ton efficacité, pour nos discussions, ta franchise. Ce fût un vrai plaisir de te rencontrer et d'avoir pu travailler avec toi pendant ces années. J'espère que tu t'épanouiras dans ta nouvelle vie. Je n'oublie pas non plus Dominique Moncomble et Laurent Panigai. Merci beaucoup pour votre disponibilité et pour votre confiance en ce projet. Enfin, merci à François Langellier pour ta disponibilité et ton efficacité pour les données météo et les renseignements que j'ai pu te demander au cours de ces trois années.

On part vers l'ouest, dans le vignoble d'Anjou. Dans cette belle région avec le climat doux et les châteaux en pierre blanche, j'ai rencontré un bon groupe de travail. Ainsi, je tiens à remercier Gérard Barbeau pour sa disponibilité, pour son accueil, pour les discussions, pour la passion qu'il porte à son vignoble, pour m'avoir montré tous les terroirs viticoles de leur région, pour son intérêt et efficacité dans le travail. Merci Gérard, ce fût un vrai plaisir pour moi de pouvoir

travailler avec toi ces trois dernières années (gracias). Je tiens aussi à remercier les autres membres de l'unité d'Angers, en particulière Déphine Ramillon qui m'a beaucoup aidé pendant la première année et demie de la thèse, merci de ta sympathie; Nicolas Bottois pour sa disponibilité et son efficacité, ainsi que pour nous avoir permis de travailler sur ces données de son réseau, merci beaucoup; et merci à Séverine (merci de ton travail et de ta disponibilité et efficacité, même si l'on ne se connaît pas), à Chantal et aux autres membres de l'unité, ainsi qu'aux membres de la station de Montreuil Bellay. J'espère pouvoir vous revoir un jour.

Si l'on descend vers le sud, on trouve le vignoble de Cognac. Ici, je remercie de manière très spéciale Vincent Dumot du BNIC. Merci Vincent de ta disponibilité, de ta passion pour ton travail, de ton efficacité, de ta précision, de tes questions pas toujours faciles à répondre, des nos discussions au téléphone, de ton accueil, de m'avoir montré la région. Je suis très content de t'avoir rencontré et j'espère que l'on pourra continuer à maintenir le contact dans l'avenir. Je tiens aussi à remercier à Jean Philippe et à Beatrix qui ont beaucoup travaillé pendant la première année de cette thèse, ainsi qu'aux autres membres de la station technique du BNIC, que je ne connais pas, mais je sais qu'ils ont beaucoup travaillé dans les expérimentations. Merci aussi aux viticulteurs qui ont mis à notre disposition les parcelles de l'étude. Sans leur confiance, ce travail n'aurait pas pu voir le jour.

Si l'on descend un petit peu, on arrive au vignoble de Bordeaux. Là-bas, j'ai eu la chance de pouvoir travailler avec les membres de l'unité d'écophysiologie de la vigne, de l'INRA. Je voudrais remercier de manière spéciale Jean Pascal Goutouly pour ta disponibilité, pour ton efficacité et ta précision, pour toutes les discussions que nous avons eu ensemble jusqu'à ce que je devienne ton pire cauchemar (TPC), pour ta bonne humeur, pour les commentaires pendant les dégustations des vins allemands. Merci de ta sympathie et j'espère que l'on continuera à se croiser. Je tiens aussi à remercier les autres membres de l'unité pour leur accueil et leur sympathie: Jean Pierre Soyer, Philippe Vivin, Philippe Pieri, Benjamin Bois, Claude Bonnet, Giuliano Pereira, Elisa.

Enfin, de retour vers la maison, je n'oublie pas les personnes qui m'ont aidé depuis le Languedoc. Tout d'abord, je tiens à remercier Christian Gary, pour ta disponibilité pour participer à mon comité de pilotage, pour ton éclairage et tes commentaires de mon travail. Merci beaucoup. Je tiens aussi à remercier mes copains de galère thésardienne: Florian et Hector. Je suis content d'avoir pu partager quelques moments de réflexion et de travail pendant ces trois dernières années et d'avoir pu discuter avec vous sur notre avenir. J'espère que ces trois années de travail amèneront à une belle réussite en France ou au Chili. Bon courage!!! Je voudrais remercier Eric Lebon et Gaetan Louarn, pour leur disponibilité et pour avoir toujours répondu à mes demandes sur des questions plus physiologiques. Merci beaucoup. Je voudrais aussi remercier de manière importante le travail d'Eliau Salançon de l'ITV-Montpellier-Nîmes. Merci de ton aide, de ta bonne humeur, de ta disponibilité, de ton efficacité et de ta sympathie. J'étais très content de te rencontrer. Je n'oublie pas aussi Eric Chantelot, Ludivine Delaeter et Isabelle de Munter. Merci beaucoup pour votre travail pendant la première année de thèse pour pouvoir démarrer ce projet.

Je voudrais dire aussi un grand merci à tous ceux que j'ai eu la chance de rencontrer dans le cadre de congrès internationaux et avec qui j'ai partagé de bons moments. Ce type de rencontres font que l'on a envie de repartir en congrès le plus rapidement possible et de travailler encore plus pour avoir de choses à présenter dans les prochaines congrès. Ainsi, dans la partie française, je tiens à remercier Nathalie Ollat, Eric Serrano, Thierry Dufourcq, Magalie Lafontaine pour les bons moments vécues ensembles. En la comunidad española, quisiera agradecer los buenos momentos vividos con los "irreductibles" que he conocido en mis viajes: Vicente Sotés, Hipolito Medrano (y a Jaume Flexas por su ayuda y disponibilidad), Jose Ramon Lissarrague, Pilar Baeza, Patricia, Jesus Yuste, Felicidad de Herralde, Fermi Ferre. Gracias por esos buenos momentos y vuestra disponibilidad a distancia durante la tesis. Je voudrais aussi remercier les personnes les

plus internationales: Yann Guisard pour sa sympathie et son aide à distance, et Gregory Jones, thank you Greg for your help about phenology and budbreak. I hope to see you soon.

Quisiera dar las gracias por su apoyo y su confianza a Miguel Quemada y Margarita Ruiz que han permitido que pueda tener una colaboracion con ellos y ademas poner en practica un intercambio de estudiantes que espero dure muchos años y dé tan buenos resultados como los obtenidos hasta ahora. Muchas gracias a los dos.

Ici je tiens à remercier quelques personnes que j'ai rencontré dans le cadre de mes études et qui ont eu une grande influence sur moi et sur mon avenir par leur soutien et leur confiance. Je voudrais ainsi remercier à toute l'équipe d'accueil de l'ISARA-Lyon, et en spécial à Monique Patuano, Michelle Crubly et Bernard Fabre pour leur aide pendant les premiers mois (toujours compliqués) en France. Merci de votre accueil, votre soutien et votre sympathie. Y un enorme gracias a Luis Miguel Arregui, mi querido tutor de proyecto final de carrera. Muchas gracias por haber estado siempre disponible, atento y por tu paciencia para soportar la traduccion de un tema tan duro como la modelizacion (y encima en Frances). Muchas gracias por tu apoyo y tus consejos durante estos años.

Voilà. Et on arrive à la partie plus personnelle. Ceux qui ont participé dans ce travail, grâce à leur non-participation directe : les moments de décontraction, rigolades, dîners, dégustations, voyages...

Ainsi je tiens à remercier mes amis d'Avignon. Un enorme merci à Alexandra et Olivier pour votre amitié, pour votre sympathie, pour votre soutien dans les moments difficiles, pour m'avoir permis de faire partie de votre vie et avoir toujours été là quand j'en avais besoin. Merci de tout mon cœur. Merci au grand Olivier (Oliv) pour ta sympathie, ta complicité, ta bonne humeur, merci de ton amitié. Merci aussi à Nico, Sylvia et Mathieu, Sandra et Fabrice, Emilie, Seb et Nadia (et les petites), Marie et François, Anouk et Cedric (et la petite Pauline), Caroline, Eglantine et Mehdi, Pierre et tellement d'autres qui ont participé à me faire sentir ici comme chez moi. Merci de m'avoir accueilli de cette manière tellement chaleureuse.

Tambien quisiera agradecer a mi amigo Alejandro, por su apoyo, amistad, comprension, ayuda desde la distancia. Muchas gracias Alex. No hace falta que te diga lo importante que eres para mi, eh testigo? Y muchas gracias a Noe y Jon por vuestra amistad y apoyo desde la distancia. Gracias por haber hecho siempre el esfuerzo de que mantengamos esta amistad que tanto cuenta para mi. Agradecer a la cuadrilla y a la gente de la Parro, a mis compañeros de la UPNA de Pamplona (especialmente a Africa, Diego y Saimon) por su apoyo desde la distancia, sobre todo con estos intervalos tan largos de mi no-presencia en casa. Da mucha alegria ver a la gente como te apoya aunque haga mucho tiempo que no nos hayamos visto. Gracias.

Je tiens à remercier de manière spéciale à ma belle-famille. Merci à tous de votre soutien, de votre intérêt, de m'avoir accueilli d'une manière tellement chaleureuse. Vous m'avez beaucoup aidé et j'ai toujours été très touché du fait de votre intérêt pour mon travail, pour mon évolution, pour mon état d'esprit et pour mon avenir. Merci d'avoir toujours été là.

Et là on arrive aux derniers, mais non des moindres.

Muchas gracias Aita y Ama en primer lugar. Muchas gracias por lo que habeis hecho por nosotros, por todo lo que nos habeis enseñado, la forma de ver la vida, la forma de entender las cosas, por nuestra educacion tanto humana como religiosa, desde el respeto, la critica y la escucha. Muchas gracias por haberme dejado hacer lo que yo consideraba bien, dando vuestra opinion, pero respetando mis decisiones... cuantas veces os las habre hecho pasar canutas!!! Espero que esteis orgullosos del trabajo realizado porque en gran parte es gracias a vosotros. Y no me olvido de mis hermanas, Blanca y Ana. Txikis, cuanto habeis tenido que soportar a cuenta de mis viajes, mis fines de semana como un pacha. Gracias a vosotras por vuestra paciencia, vuestro cariño, vuestro apoyo y comprension. Gracias por haber estado disponibles cada vez que ha hecho falta. Espero

que tengais tanta suerte como yo he tenido hasta ahora y que la vida os sonria. Podeis contar conmigo para ayudaros. Mila Esker!!!

Et finalement, merci nire Maitia. Cela peut paraître un tout petit merci de rien du tout, mais le problème c'est que je ne connais pas dans les langues suffisamment de beaux mots pour te transcrire en quelques phrases ce que tu m'as donné. Donc Merci. Nous seules savons tout ce que nous avons vécu ensemble et la quantité de galères que nous avons du surmonter pour arriver là. Le chemin n'est pas fini et bientôt on commence notre thèse à nous qui j'espère, sera pleine de bonheur, et surtout tellement agréable et douce du fait de la faire ensemble...

Voilà, c'est fini les mots sympas.

J'espère que vous avez pris de quoi manger et boire pour lire cette thèse... il faut un peu de temps devant soi... Tiens, tiens, tiens... pour boire... j'ai quelques idées... j'avais en tête un bon Côtes du Rhône (un Ventoux par exemple) ou un Languedoc rouge charnu, profond, épicé... ou sinon un Chardonnay de Bourgogne vif, expressif..., attends... ou un Champagne millésimé, un blanc des blancs, par exemple??... sinon un chenin moelleux (un bon Vouvray) ou liquoreux (un Coteaux du Layon), même un Cabernet d'Anjou rosé pourrait largement faire l'affaire... quoique... je me vois bien en train de lire cette "petite" thèse en dégustant tranquillement une bonne coupe de Cognac (assemblage de Grandes Champagnes, pour quoi pas??)... sinon quelque chose plus fraîche un Entre-deux-mers blanc (jolie mélange du sémillon et sauvignon blanc...)... ou un bon Bordeaux bien adouci par le temps... ou un txakoli bien frais... il y a tellement du choix!!!

Donc, bon appétit...

eeinh non...

Bonne lecture, pardon...

Table des matières

Introduction Générale	1
------------------------------	---

Chapitre I:

Adaptation des formalismes du modèle de culture générique STICS à la vigne

1. Etat des lieux	9
1.1. Grands traits de l'agrophysiologie de la vigne	9
1.2. Les options de STICS appropriées à cette agrophysiologie	9
1.3. Diagnostic sur les processus non ou mal pris en compte dans le modèle STICS	15
1.4. Cadre du travail	19
2. Développement.....	19
2.1. Les stades de la vigne dans STICS.....	19
2.2. Calcul de la date de débourrement de la vigne. Le modèle BRIN. (Article)	21
3. Dynamique de la croissance des baies (Article).....	45
4. Introduction du calcul du potentiel foliaire de base	67
4.1. Intérêt du potentiel de base.....	67
4.2. Formalisme d'introduction du potentiel foliaire de base dans le modèle STICS	69
4.3. Test du formalisme en mode inverse.....	71
5. La Système de conduite de la vigne dans STICS	75
5.1. Spécificités de la vigne.....	75
5.2. La structure de la plantation et ses effets dans STICS	77
5.3. Les techniques de contrôle du feuillage et du rendement en cours de végétation dans STICS	81
6. Gestion des réserves chez la vigne.	83
6.1. Base physiologique des réserves chez la vigne	83
6.2. Description du formalisme introduit dans STICS	85
7. L'azote	87
7.1. L'azote dans la vigne.	87
7.2. Le besoin d'azote de la vigne dans STICS	89
8. La sénescence des feuilles.....	91
8.1. Rôle et déterminisme de la durée des feuilles de vigne	91
8.2. Introduction de la photopériode et de la vigueur dans le calcul de la durée de vie..	93
8.3. Paramétrage et tests qualitatifs	97
9. Conclusion.....	97

Chapitre II:

Paramétrage et validation du modèle de culture générique STICS (v6.0) pour la vigne

1. Description de la méthodologie utilisée pour le paramétrage et la validation du modèle....	105
2. Bases de données et expérimentations	107

2.1.	Les deux bases de données de l'étude.....	107
2.2.	Type et organisation des données.....	115
2.3.	Détail des données d'entrée.....	117
2.4.	Détail des mesures comparable à des variables de sortie.....	121
3.	Outils statistiques d'optimisation et d'évaluation du modèle.....	125
3.1.	Optimisation.....	125
3.2.	Evaluation.....	127
4.	Paramétrage à partir de la bibliographie, par analogie ou par expérimentation.....	129
4.1.	Les températures cardinales de la physiologie de la vigne.....	129
4.2.	Développement.....	129
4.3.	Feuillage.....	131
4.4.	Interception du rayonnement.....	133
4.5.	Croissance en biomasse.....	135
4.6.	Répartition entre organes.....	135
4.7.	Compétition feuille-fruit (source-puits).....	137
4.8.	Calcul du rendement.....	137
4.9.	Racines.....	141
4.10.	Gel.....	143
4.11.	Eau dans la plante.....	143
4.12.	Azote dans la plante.....	145
5.	Paramétrage par optimisation.....	147
5.1.	Méthode d'optimisation utilisée dans notre étude.....	147
5.2.	Optimisation des paramètres en utilisant le forçage du LAI.....	147
5.3.	Optimisation des paramètres plante sans forçage du LAI.....	149
5.4.	Qualité des résultats des optimisations.....	151
6.	Validation du modèle avec la Base de Données Historiques.....	159
6.1.	Méthode et variables de la validation du modèle.....	159
6.2.	Résultats de la validation.....	161
7.	Capacités et limites du modèle STICS pour simuler le fonctionnement de la vigne.....	163

Chapitre III:

Etudes d'impacts du changement climatique sur les différents vignobles de France à l'aide du modèle STICS.

1.	Introduction.....	173
2.	Le changement climatique et son impact sur la vigne. Etat des lieux.....	173
2.1.	Le changement climatique.....	173
2.2.	Le changement climatique et la vigne.....	177
3.	Données, méthodes utilisés et description du protocole de simulation.....	185
3.1.	Données météorologiques.....	187
3.2.	Choix de structures de plantation et de pratiques techniques pour réaliser les simulations.....	193
3.3.	Les formalismes du modèle STICS pour l'étude du changement climatique.....	197
3.4.	Variables de sortie étudiées.....	199
3.5.	Méthodologie utilisée pour analyser les impacts du changement climatique.....	199
4.	Impacts du changement climatique sur les différentes régions viticoles, selon leur structure actuelle.....	203
4.1.	Phénologie et date de vendange.....	203

4.2.	Stress	209
4.3.	Biomasse et LAI.....	211
4.4.	La maturation du raisin	221
4.5.	Environnement	227
4.6.	Résumé des principaux résultats	227
5.	Etude pour la proposition de stratégies d'adaptation au changement climatique dans les différents vignobles de l'étude.....	229
5.1.	Méthodologie développée	229
5.2.	Stratégies évaluées dans chaque région	233
6.	Considérations générales et limites de notre étude d'impacts	251
 Conclusion et Perspectives		 261
Références bibliographiques		277
 Annexes		

Introduction

Introduction Générale

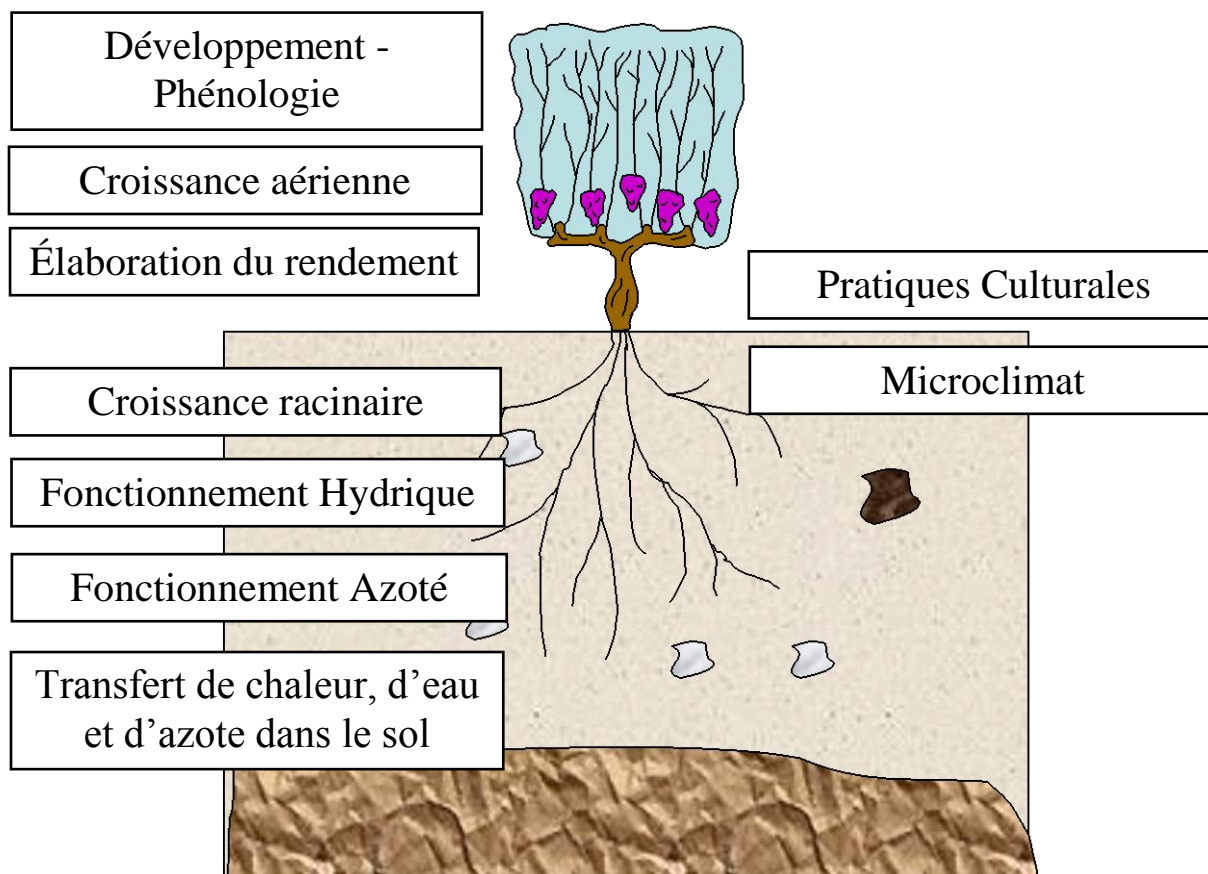
Les modèles de cultures, qui se sont développés depuis une trentaine d'années, offrent un cadre conceptuel pour étudier les interactions dynamiques entre la plante, le sol, le climat et les techniques culturales à l'échelle parcellaire. Cependant l'essentiel des efforts de modélisation a porté sur les grandes cultures (Brisson *et al.*, 1998a et 2003). Ainsi le modèle STICS (Simulateur de mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard), développé à l'INRA depuis 1996, décrit un grand nombre de processus écophysologiques et agronomiques, représentatifs du fonctionnement de la plupart des espèces cultivées, en grande partie annuelles. L'adaptation de ce modèle à la vigne, avait le double intérêt de bénéficier des efforts d'intégration de connaissances déjà aboutis dans STICS, et d'y introduire ou améliorer des formalismes particuliers au fonctionnement des plantes pérennes ligneuses, tant du point de vue écophysologique (par exemple, la dormance hivernale ou la gestion de réserves carbonées et azotées) que technique (cultures en rangs, rognage, éclaircissage,...).

L'élaboration d'un tel outil, permettait non seulement d'approfondir notre compréhension du fonctionnement de ces systèmes complexes, mais également d'étudier ce fonctionnement dans le cadre d'un changement global. Sachant que les perspectives d'évolution du climat, en relation avec l'émission de gaz à effet de serre d'origine anthropique, auront des conséquences probables sur les productions agricoles (IPCC, 2001), le modèle de culture adapté à la vigne devient un outil privilégié pour l'étude de ces impacts.

Nos objectifs ont donc été les suivants: d'une part adapter le modèle STICS au fonctionnement de la vigne, et ensuite l'utiliser pour analyser les impacts du changement climatique sur cette culture. Dans un souci de robustesse et de représentation spatiale, nous avons conduit cette étude à l'échelle de la France.

Les modèles de cultures peuvent être divisés principalement en deux catégories, de par leur complexité et leur utilité: d'une part les modèles "empiriques" dans lesquels les relations sont simplifiées et basées sur des analyses statistiques qui ne prennent pas en compte les processus internes du système; d'autre part, les modèles "mécanistes", lesquels décrivent et quantifient chaque processus à l'intérieur du système. Ce dernier type de modèles a été initialement très peu développé pour la vigne (et de façon incomplète) et leur utilisation reste très restreinte. Ainsi, la plupart de modèles élaborés jusqu'à aujourd'hui décrivent la croissance et le développement de la vigne, sans tenir compte du bilan hydrique du sol (ce qui limite la possibilité d'étudier l'effet des stress hydriques), ni de la plupart des pratiques culturales habituelles (travail du sol, éclaircissage, rognage), ce qui limite leur utilisation aux conditions de leur développement (Gutierrez *et al.*, 1985; Williams *et al.*, 1985 a et b; Wermenlinger *et al.*, 1991; Bindi *et al.*, 1997 a et b; Lakso et Poni, 2005). Parmi ces modèles, seul celui de Wermenlinger *et al.*, (1991) décrit le bilan azoté de la plante, et uniquement dans des conditions non limitantes. Un modèle plus récent, VineLogic (Walker *et al.*, 2005) décrit un certain nombre de choix techniques et présente un module de bilan hydrique, mais reste très orienté vers l'aide à la décision, dans une gamme de choix très spécifiques à la viticulture australienne (problèmes de salinité, types de sols..) difficilement extrapolables à nos conditions. Enfin, Nendel et Kersebaum (2004) ont adapté de façon simple le modèle SUCROS à la vigne, afin d'étudier le bilan azoté dans des sols viticoles, mais le domaine de validité de ce modèle reste assez limité.

Figure 1. Schéma d'organisation des différents modules du modèle de cultures générique STICS.



Brisson *et al.*, (2002b) ont présenté une première version du modèle STICS (Brisson *et al.*, 1998a, 2003) adapté à la vigne. STICS simule le fonctionnement des cultures à pas de temps journalier, à l'échelle de la parcelle, supposée être un système homogène. Ses variables d'entrées décrivent le climat, le sol et le système de culture. Le système de culture est défini par un peuplement de plantes (espèce et variété) et l'itinéraire technique appliqué dans la parcelle. Ses variables de sorties décrivent la production et l'évolution des caractéristiques du sol sous l'effet de la culture. Les grands processus simulés sont la croissance et le développement de la culture, ainsi que les bilans hydriques et azotés. La culture est représentée par sa biomasse aérienne et sa teneur en azote, son indice foliaire ainsi que le nombre et la biomasse des organes récoltés (Brisson *et al.*, 1998a, 2002a et b, 2003).

Les principaux avantages de STICS par rapport aux autres modèles cités ci-dessus sont: la prise en compte du bilan hydrique, carboné et azoté et de l'effet des stress qui y sont liés sur la croissance; la prise en compte des réserves carbonées et azotées; la description de la concurrence trophique entre les feuilles (les sources) et les fruits (les puits) pendant la croissance de la plante; et la possibilité de réaliser une large gamme de techniques culturales (de gestion du feuillage, du sol et du rendement). Toutes ces caractéristiques font de lui un outil complet qui permet de bien appréhender les complexes relations environnementales.

La généricité du modèle STICS se caractérise par sa capacité à simuler différentes cultures (espèces) et itinéraires techniques, sans que sa structure globale soit modifiée. Cette généricité est facilitée par l'organisation du modèle en neuf modules faisant appel à un certain nombre de sous-programmes traitant de mécanismes spécifiques (Figure 1). Ces modules peuvent être classés en trois groupes : un premier groupe de trois modules traite de l'écophysiologie des parties aériennes des plantes (modules de développement, croissance aérienne, élaboration du rendement) ; un second groupe de quatre modules concerne le fonctionnement du sol en interaction avec les parties souterraines des plantes (modules croissance racinaire, bilan hydrique, bilan azoté, transferts) ; un troisième groupe permet la gestion des interactions entre les techniques culturales et le système sol-culture, qu'il s'agisse des apports d'eau, d'engrais ou du microclimat (Brisson *et al.*, 1998a, 2002a et b et 2003). Le modèle propose dans chacun des neuf modules, plusieurs options de formalismes représentant les grandes caractéristiques écophysiologiques des plantes.

Par ailleurs, les perspectives d'évolution du climat énoncées par l'IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change) prévoient une augmentation importante des gaz à effet de serre d'origine anthropique à la fin du XXI^{ème} siècle. Les prévisions réalisées à partir de ce scénario futur par les modèles climatiques globaux, se sont affinées et ont gagné en fiabilité, ce qui permet de conduire des études d'impact, en particulier dans le domaine agricole. Ainsi, il semble à présent bien établi que la température moyenne va augmenter (l'ampleur de l'augmentation étant liée à nos capacités de régulation des émissions de gaz à effet de serre) et que dans le cas de la France plus précisément, les écarts de pluviométrie entre nord et sud d'une part, et entre saisons d'autre part, vont s'accroître (Planton, 2003).

En ce qui concerne la viticulture, cette évolution du climat est visible ces dernières années, et elle s'est traduite par des impacts significatifs sur le développement et la qualité: on a constaté un avancement des stades phénologiques et de la date de vendange dans différentes régions de la planète (Jones *et al.*, 2005b), ainsi qu'une évolution de la qualité des vins produits dans chaque région (Jones *et al.*, 2005a; Duchêne et Schneider, 2005), sans que cela puisse être seulement expliqué par des modifications d'ordre technique (Seguin et García de Cortázar, 2004).

D'autre part, les études d'impact réalisées jusqu'à présent sur la vigne montrent quelques tendances globales, comme un avancement des stades et un raccourcissement du cycle, un impact sur la production de biomasse qui diffère selon les régions, et des modifications de la classification climatique des différents vignobles (Bindi *et al.*, 2000a et b ; García de Cortázar *et al.*, 2004). En revanche, ces résultats sont limités : d'une part soit le modèle agronomique utilisé ne prend pas en compte le bilan hydrique (cas du modèle de Bindi), soit il n'est pas réellement adapté à la vigne (Brisson *et al.*, 2002b); d'autre part les travaux basés sur l'évolution des différents indices climatiques viticoles (en majorité thermiques) permettent d'avoir un aperçu général des modifications attendues dans le futur, mais ne tiennent pas compte du fonctionnement de la plante et de sa relation avec le milieu.

Ces constatations révèlent la nécessité pour ce type d'études d'impacts, d'utiliser un modèle mécaniste qui puisse prendre en compte l'ensemble du système viticole, y compris ses interactions internes. Dans ce cadre, le modèle STICS adapté à la vigne à l'échelle de la France s'avère un outil pertinent.

Notre travail s'est donc décomposé en deux parties.

Une première partie a consisté à adapter le modèle STICS à la vigne et est explicitée dans les deux premiers chapitres de cette thèse.

Le **chapitre I** présente les différents modules du modèle STICS et détermine en quoi leurs formalismes sont ou non adaptés à la culture de la vigne. Ce chapitre met en évidence les insuffisances du modèle pour décrire correctement l'écophysiologie de cette culture, et les techniques qui lui sont spécifiques. Il propose de nouveaux formalismes ou la modification des formalismes existants.

Le **chapitre II** décrit le paramétrage et la validation du modèle. Cette phase s'appuie sur les différentes bases de données et expérimentations qui ont été mises en place en collaboration avec différents organismes techniques et de recherche des différents régions de France : Côtes du Rhône, Languedoc, Bordeaux, Cognac, Bourgogne, Val de Loire et Champagne. Chacun des paramètres caractérisant le fonctionnement de la vigne dans le modèle STICS est décrit et estimé, soit par des données issues des expérimentations, soit par la bibliographie, soit par des méthodes d'optimisation. La qualité d'ajustement de ces paramètres est alors évaluée sur une base de données indépendante. Enfin, les capacités et les limites du modèle adapté à la vigne sont précisées.

La seconde partie de notre travail est une étude d'impact du changement climatique dans les vignobles de France, à partir du couplage du modèle STICS et des données climatiques simulées par le modèle ARPEGE-Climat. Elle est présentée dans le **chapitre III**. Un bilan des connaissances actuelles sur le changement climatique et ses impacts sur la vigne est d'abord dressé. La méthodologie utilisée pour réaliser le couplage entre le modèle STICS et le modèle ARPEGE est ensuite décrite, ainsi que le protocole de simulations utilisé. Deux analyses d'impacts sont enfin réalisées : une première analyse supposant que la structure actuelle des vignobles en ce qui concerne les itinéraires techniques est conservée, et une deuxième analyse qui explore des stratégies d'adaptation de ces itinéraires pour chaque région viticole.

Une conclusion générale résume l'ensemble des résultats obtenus et des perspectives de recherche sont proposées.

Chapitre I

CHAPITRE I

Adaptation des formalismes du modèle de culture générique STICS à la vigne

1.	Etat des lieux.....	9
1.1.	Grands traits de l'agrophysiologie de la vigne	9
1.2.	Les options de STICS appropriées à cette agrophysiologie.....	9
1.3.	Diagnostic sur les processus non ou mal pris en compte dans le modèle STICS	15
1.4.	Cadre du travail.....	19
2.	Développement	19
2.1.	Les stades de la vigne dans STICS	19
2.2.	Calcul de la date de débourrement de la vigne. Le modèle BRIN. (Article)	21
3.	Dynamique de la croissance des baies (Article)	45
4.	Introduction du calcul du potentiel foliaire de base.....	67
4.1.	Intérêt du potentiel de base	67
4.2.	Formalisme d'introduction du potentiel foliaire de base dans le modèle STICS	69
4.3.	Test du formalisme en mode inverse	71
5.	La Système de conduite de la vigne dans STICS.....	75
5.1.	Spécificités de la vigne	75
5.2.	La structure de la plantation et ses effets dans STICS	77
5.3.	Les techniques de contrôle du feuillage et du rendement en cours de végétation dans STICS	81
6.	Gestion des réserves chez la vigne.....	83
6.1.	Base physiologique des réserves chez la vigne.....	83
6.2.	Description du formalisme introduit dans STICS	85
7.	L'azote	87
7.1.	L'azote dans la vigne.....	87
7.2.	Le besoin d'azote de la vigne dans STICS	89
8.	La sénescence des feuilles.....	91
8.1.	Rôle et déterminisme de la durée des feuilles de vigne	91
8.2.	Introduction de la photopériode et de la vigueur dans le calcul de la durée de vie .	93
8.3.	Paramétrage et tests qualitatifs.....	97
9.	Conclusion	97

Tableau 1. Echelles de développement de STICS pour les plantes indéterminées appropriées pour la vigne

Stades Végétatifs (indice foliaire)	Stades Organes Récoltés
DEBDORM et FINDORM : entrée et levée de dormance (ligneux)	
LEV : débourrement végétatif	
AMF : accélération maximale de croissance foliaire, fin de phase juvénile	FLO : floraison (début sensibilité au gel des fruits)
LAX : fin de croissance foliaire	DRP : début remplissage des organes récoltés
	DEBDES : début dynamique hydrique des fruits
	NOU : fin de la nouaison
	MAT : maturité physiologique

1. Etat des lieux

1.1. Grands traits de l'agrophysiologie de la vigne

La vigne est une plante pérenne, à croissance indéterminée et à fruits charnus (Gary *et al.*, 2003). Par plante pérenne, on entend un système racinaire déjà établi, au début du cycle végétatif, qui contient en outre des réserves carbonées et azotées. Le terme croissance indéterminée s'applique aux espèces chez lesquelles il existe une compétition trophique entre les feuilles et les fruits (Brisson *et al.*, 2003).

Deux cycles différents se produisent simultanément pendant la croissance de la plante (Coombe et Dry, 1988). Le cycle végétatif commence avec le développement des bourgeons axillaires l'année précédente ; suivi de la dormance, le débourrement, la croissance des rameaux et leur aoûtement ; ce cycle se termine par la chute des feuilles. Le cycle reproductif commence par l'initiation florale qui se réalise l'année précédente et se termine avec la maturité et la récolte. A partir de la floraison, il existe une concurrence trophique entre le développement végétatif et reproductif.

Les plantes à fruits charnus se distinguent par un certain nombre de spécificités physiologiques. Ainsi dans ce type de fruit on observe deux dynamiques simultanées et différentes : la dynamique de l'eau et celle de la matière sèche. Dans le cas de la vigne, une diminution de la teneur en eau se produit en même temps qu'une augmentation de la matière sèche de la baie (Ollat, 1997 ; Matthews et Shackel, 2005).

Il existe plusieurs structures de plantation, mais toutes relativement ouvertes, correspondant à des structures en rang. Par ailleurs, la culture de la vigne comporte beaucoup de spécificités dans sa conduite, visant à maîtriser le feuillage et le rendement. Il s'agit de techniques de rognage, effeuillage, éclaircissage et taille.

1.2. Les options de STICS appropriées à cette agrophysiologie

Dans le cas de la vigne (*Vitis vinifera* L.), l'adaptabilité des principaux formalismes avait été déjà étudiée par Lecoq (2002) et Brisson *et al.*, (2002b). La description suivante des modules de STICS, qui correspond à l'état initial du modèle au début de l'étude, est volontairement non exhaustive et simplificatrice. Seules, les informations indispensables à la compréhension de ce chapitre et les options des formalismes du modèle appropriées à la vigne sont présentées ici. Les détails de chaque formalisme sont donnés dans la notice du modèle (Brisson *et al.*, 2002c).

1.2.1. Le développement

Le développement de la plante dans le modèle STICS est contrôlé par la définition de différents stades utiles à la simulation. Deux échelles indépendantes sont définies dans le modèle : une échelle végétative et une échelle reproductrice (Tableau 1)

Parmi les stades proposés par le modèle, il en existe qui correspondent effectivement aux stades couramment observés chez la vigne : le débourrement végétatif et la floraison ; d'autres sont des stades physiologiquement connus mais peu observés : la fin de la nouaison, l'entrée et la levée de dormance, l'arrêt de croissance foliaire ; et les derniers sont des étapes génériques de la croissance de la plante ou des fruits spécifiques du modèle : accélération maximale de la croissance foliaire, début de la dynamique hydrique des fruits, début du remplissage et maturité physiologique des fruits.

Le temps de développement est basé sur le concept de Growning-Degrees-Day (GDD) (Bonhomme, 2000), déterminés comme le cumul de la température moyenne de l'air du jour moins une température base. Ainsi, la vigne (*Vitis vinifera* L.) est considérée comme une plante non-photopériodique (Alleweldt, 1957, 1959, 1963a et b, 1964), qui a des besoins en froid pour démarrer son cycle (période de dormance avant le débourrement).

1.2.2. Croissance Aérienne : LAI et biomasse totale

Le module Croissance Aérienne permet de calculer le LAI (Leaf Area Index), et la croissance en biomasse. Le LAI dépend à la fois du stade de développement, de la température et de l'état trophique, hydrique et azoté de la plante. En début du cycle, cette croissance est fortement dépendante des réserves carbonées et azotées. La sénescence des feuilles est calculée en fonction d'une durée de vie génétique dépendant de l'espèce, qui peut être raccourcie par divers stress (hydrique, azoté, gel). Ce module calcule ensuite l'interception du rayonnement par un formalisme de type "Transfert radiatif", qui prend en compte la géométrie du couvert (espacement et orientation des rangs) et la forme du profil de densité foliaire (Brisson *et al.* 2004). Cette forme est supposée constante tout au long du cycle et elle croît de façon isotrope avec l'indice foliaire, jusqu'à atteindre les limites géométriques prescrites, en supposant une densité des feuilles constante à l'intérieur de la forme.

La croissance en biomasse aérienne est calculée à partir de l'efficacité de conversion du rayonnement intercepté. Cette efficacité est dépendante du stade de développement de la plante et des stress hydrique et azoté. L'accumulation d'azote dans la plante suit l'accumulation du carbone.

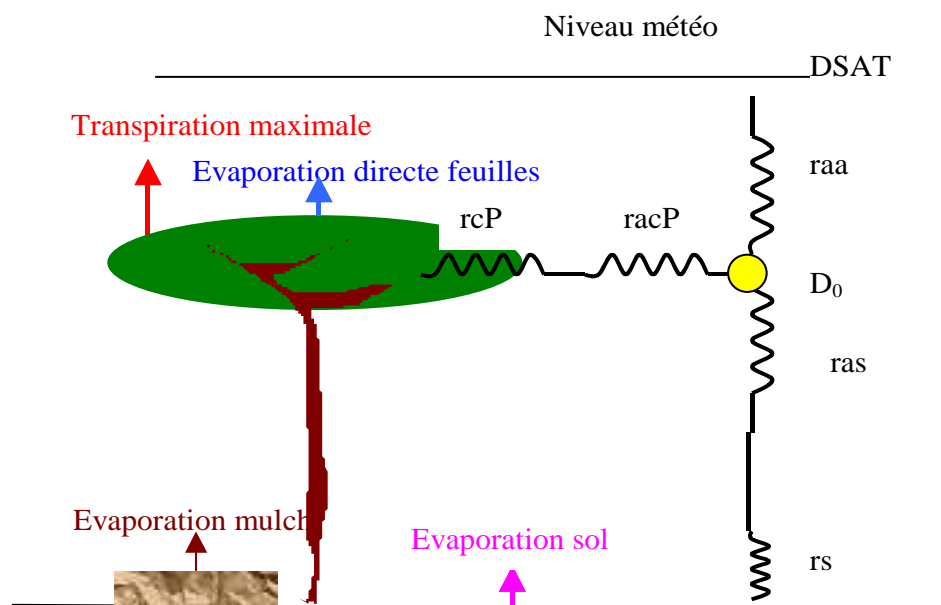
Il existe un compartiment de réserves carbonées dans le modèle qui n'est pas localisé (cela peut-être dans les racines, la structure des rameaux ou les feuilles). Ces réserves peuvent être remobilisées pendant le cycle en fonction d'un bilan entre les assimilats générés par la photosynthèse et leur utilisation dans la croissance des parties végétatives (feuilles et rameaux) et des fruits. Les réserves sont initialisées au début de la simulation en fonction du type de taille, densité et vigueur. Elles sont utilisées dans la croissance comme un complément (surtout au début du cycle), leur déstockage étant proportionnel à la quantité présente. Les réserves azotées ne sont pas soumises à la même dynamique, c'est juste une quantité d'azote gardée en fin du cycle et réadditionnée en une seule fois à la quantité d'azote de la plante au début du cycle suivant.

Les stress sont des indices variant entre 0 et 1, qui vont réduire les fonctions vitales de la plante (1 = absence de stress ; 0 = stress maximal), avec des gradients différents : la croissance du feuillage est affectée plus précocement que les processus de photosynthèse et de sénescence. Ces stress sont de nature abiotique exogène (stress azoté, hydrique, thermique, dont l'effet du gel) et endogène (stress trophique : concurrence entre les feuilles et les fruits pour les assimilats disponibles).

1.2.3. Elaboration du rendement

Le module **Elaboration du Rendement**, qui calcule les composantes du rendement, entre en fonctionnement à partir de la nouaison du fruit. Il existe une gestion de la concurrence entre les feuilles et les fruits qui s'appuie sur le rapport source/puits. Les sources sont les assimilats néoformés et les remobilisations carbonées, tandis que les puits correspondent au potentiel de croissance des organes végétatifs et des fruits. Le remplissage des fruits se fait par la technique de "boxcartrain" (Goudriaan, 1986 ; Jones *et al.*, 1991) : les fruits regroupés en inflorescences (ce sont les grappes de la vigne) passent par des compartiments correspondant à des âges physiologiques croissants, dont on définit *a priori* le nombre. La durée de séjour d'un fruit dans un compartiment dépend de la température. Dans chaque compartiment, la croissance des fruits est calculée par une croissance potentielle ("force des puits" des fruits) qui peut être diminuée par le

Figure 2. Schéma du modèle résistif de Shuttleworth et Wallace issu de la notice de STICS (Brisson *et al.*, 2002c). RAS est la résistance aérodynamique entre le sol et le couvert ; RAA est la résistance aérodynamique entre le couvert et le niveau de référence ; RS est la résistance du sol ; RCP est la résistance du couvert ; $RACP$ est la résistance de couche limite du couvert. Do est le déficit de saturation interne de la végétation; et $DSAT$ est le déficit de saturation au niveau de référence météo.



rapport source/puits. La fonction proposée est la dérivée d'une courbe logistique dont le plateau correspond au poids maximal d'un fruit grandissant sans contrainte. Dans le dernier compartiment les fruits ne grossissent plus, ils ont atteint leur masse sèche finale : c'est la maturité physiologique. La teneur en eau des fruits est simulée dynamiquement à partir d'un stade nommé début de déshydratation des fruits, qui avait été identifié comme étant la véraison. Cette dynamique comporte une composante phénologique et une composante liée à l'état hydrique de la culture. D'autre part, une biochimie élémentaire des fruits (teneur en sucre, en huile et en azote par rapport à la matière sèche) est calculée à la récolte. Celle-ci peut donc être déclenchée en fonction de différents critères qualitatifs selon l'objectif recherché : teneur en eau, sucre, maturité physiologique.

1.2.4. La croissance racinaire

Le module **Croissance Racinaire** calcule la croissance du front racinaire et la densité racinaire en fonction de la température du sol, l'humidité du sol et de sa densité apparente. Dans STICS, la croissance des racines est déconnectée de la croissance aérienne et ce sont directement des longueurs de racine qui sont calculées, sans passer par la masse racinaire car la longueur spécifique (rapport longueur/masse de racine) varie en fonction des contraintes subies par la plante. Les racines jouent uniquement un rôle fonctionnel d'absorbeur d'eau et d'azote minéral. Cependant la masse des racines est estimée pour calculer à leur mort, leur recyclage dans le bilan azoté du sol. L'arrêt de la croissance du front racinaire peut être conditionné par la présence d'obstacles de nature physique (par exemple, roche mère), ou de nature chimique (anoxie) ; elle va de paire avec la croissance foliaire. La répartition des racines se fait par couche élémentaire de 1 cm en fonction de la proportion des racines présentes dans chaque horizon (information fournie dans les initialisations du modèle) et des différentes contraintes présentes dans le sol (sécheresse, compaction du sol, anoxie, obstacle).

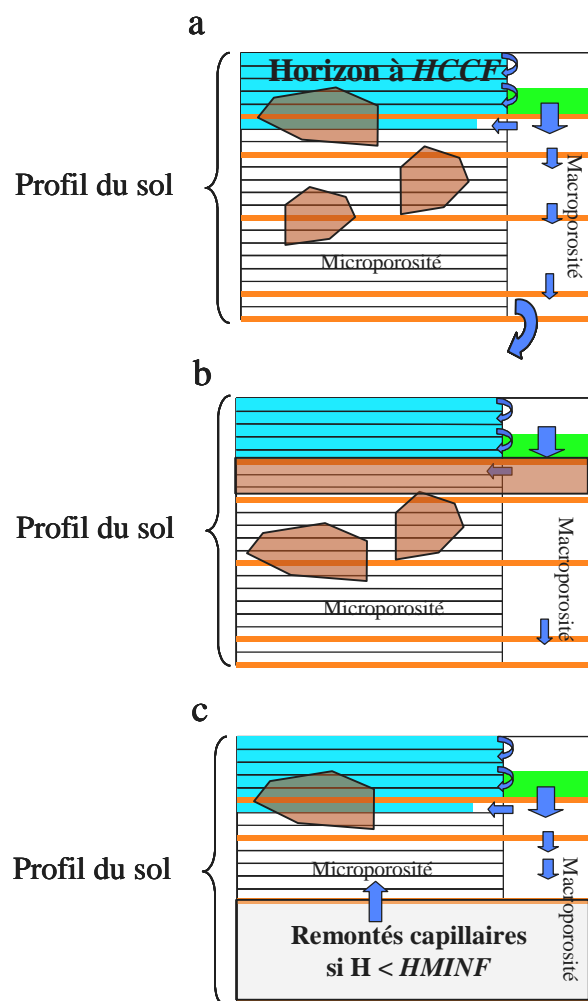
1.2.5. Le fonctionnement hydrique

Le module fonctionnement Hydrique s'appuie sur le calcul des différents termes d'offre et de demande hydrique de la plante. L'inadéquation entre offre et demande est à l'origine de stress hydriques qui vont limiter la Croissance Aérienne, à partir des caractéristiques de la plante, du sol et du climat. L'offre du sol est déterminée par le bilan entre la somme d'apports : la pluie, l'irrigation (cf. Gestion Technique) et les remontées capillaire (cf. Transfert de chaleur, d'eau et de nitrates) ; et la somme de pertes : par évaporation directe, ruissellement et drainage (ces deux derniers sont aussi gérés dans le module Transfert de chaleur, d'eau et de nitrates). La demande en eau des plantes ainsi que l'évaporation du sol, sont calculées par une approche "résistive" décrite dans Brisson *et al.* (1998b) (Figure 2). Ce module permet de calculer la transpiration de la plante, qui dépend en premier ordre de la teneur en eau du sol et des besoins (Brisson *et al.*, 1998a). Il permet aussi de simuler la distribution de ces prélèvements dans le sol.

1.2.6. Le fonctionnement azoté

Le module de fonctionnement azoté permet de calculer les différentes composantes du cycle de l'azote. L'offre du sol est déterminée par le bilan entre les apports : les apports d'engrais (cf. Gestion Technique), et la minéralisation de la matière organique ; et les pertes par volatilisation, dénitrification, réorganisation, ou lixiviation (cf. Transfert de chaleur, d'eau et de nitrates). La demande de la plante est définie par le concept de courbe maximale de dilution d'azote. Ce module permet de calculer les différents indices de stress azoté et pour cela, il utilise le concept de courbe critique de dilution (Lemaire *et al.*, 1997).

Figure 3. Schémas qui décrivent les différents compartiments du sol et la circulation de l'eau dans le profil du sol, selon le modèle STICS. **a)** Description de la circulation de l'eau en sol profond et filtrable ; **b)** description de la circulation de l'eau en sol profond potentiellement tassé ; **c)** description de l'eau en sol superficiel sur substrat poreux; dans ce dernier cas les valeurs de H et $HMINF$ correspondent au dernier horizon. $HCCF$ est l'humidité à la capacité au champ de chaque horizon (terre fine) ; $HMINF$ l'humidité au point de flétrissement permanent de chaque horizon (terre fine) ; et H est l'humidité pondérale de l'horizon. La couleur bleue signifie l'eau disponible dans la microporosité qui accessible à la plante; la couleur verte signifie l'eau dans la macroporosité qui est génératrice d'anoxie; la couleur marron signifie le tassement du sol.



1.2.7. Transferts

Le module **Transfert de chaleur, d'eau et de nitrates** permet de simuler la température du sol à partir de la température à la surface calculée dans le module "**Microclimat**" et d'une conductivité thermique liée au milieu, ainsi que les quantités d'eau et d'azote dans le sol. En ce qui concerne le transfert d'eau et de nitrates dans le sol, celui-ci est divisé en trois compartiments : la microporosité, la macroporosité et les cailloux. Le transfert de l'eau dans la microporosité du sol est calculé par couche élémentaire de 1 cm en utilisant une analogie de type réservoir. Les apports d'eau remplissent les couches en cascade sachant que la limite supérieure de chaque réservoir élémentaire correspond à la capacité au champ de la couche. Le transfert de nitrate est calculé par une fonction du type Burns (Mary *et al.*, 1999). Tout le nitrate arrivant par convection avec l'eau dans une couche élémentaire se mélange avec le nitrate déjà présent. L'excès d'eau repart ensuite avec la nouvelle concentration du mélange. Dans le cas des nitrates, la couche élémentaire de mélange est de 10 cm (sinon la dispersion est trop faible). Le modèle tient compte du taux et de la nature des cailloux et de leur impact dans l'humidité et densité de chaque horizon. La circulation de l'eau dans la macroporosité du sol se fait en utilisant la notion d'infiltrabilité et permet des remontées capillaires depuis le sous-sol en fonction de l'état hydrique de la base du sol (Figure 3).

1.2.8. Gestion technique

Le module **Gestion Technique** permet de prendre en compte les différents apports à la culture : l'irrigation, les apports d'azote et de résidus organiques (i.e. le bois de taille). Il permet aussi de calculer les modifications générées sur la surface du sol, par la présence d'un mulch ou la réalisation d'un labour, sur l'évaporation, la température du sol et le ruissellement. Ce module reproduit aussi la gestion du feuillage : rognage et effeuillage ; ainsi que le contrôle de la récolte par la gestion du nombre des fruits (éclaircissage) ou par la définition d'un critère de récolte (en fonction de l'eau, sucre).

1.2.9. Microclimat

Le module **Microclimat** permet de calculer l'humidité au sein du couvert et la température de culture (Brisson *et al.*, 2002c, e). Cette température de culture est une synthèse de l'état hydrique de la plante, du taux de couverture du sol et du climat. Elle est utilisée comme variable d'état dans la formulation de la photosynthèse et de la croissance foliaire, et sert de condition à la limite pour le calcul de la température du sol.

1.3. Diagnostic sur les processus non ou mal pris en compte dans le modèle STICS

Notre analyse, qui fait suite à un travail pionnier de Lecoq (2002) et de Brisson *et al.*, (2002b) et s'appuie sur les caractéristiques physiologiques de la vigne, nous a conduits à remettre en question des formalismes et à en intégrer des nouveaux.

1.3.1. Le calcul de la date de débourrement.

Ce stade phénologique représente le début du cycle végétatif, il est par conséquent indispensable qu'il soit correctement calculé pour assurer une bonne simulation du démarrage de la culture. Dans son travail d'adaptation de STICS à la vigne, Lecoq (2002) a montré que le modèle ne simulait pas bien ce stade phénologique en utilisant une somme de températures en base 10°C, à partir du 1^{er} janvier ; il a été obligé de

forcer cette date pour le démarrage de la simulation. Nous avons donc proposé un nouveau calcul de la date de débourrement qui sera décrit par la suite (cf. §2 de ce chapitre).

1.3.2. La description de la maturité.

Si le modèle simule effectivement la double dynamique de l'eau et de la matière sèche des baies ainsi que leur asynchronisme, il reste à vérifier que la représentation mathématique proposée est bien conforme avec la réalité du fonctionnement de la baie. En particulier, la forme de la croissance de la baie de raisin est classiquement décrite par une double sigmoïde (Champagnol, 1984 ; Matthews et Shackel, 2005), ce qui n'est pas le cas dans STICS. Une méthodologie basée expérimentalement sur la densité des baies (densimétrie) a été adaptée afin d'obtenir les différentes données nécessaires pour caractériser ces trois processus (cf. § 3 de ce chapitre).

1.3.3. L'introduction du calcul du potentiel foliaire de base.

Le potentiel foliaire de base est un indicateur du stress hydrique de la plante très répandu en viticulture. Il représente aussi l'état hydrique du sol. Il sera utilisé pour ajuster les différents paramètres du sol à la place de la teneur en eau difficile à mesurer dans les sols viticoles. Un nouveau formalisme a été introduit pour le calcul de ce potentiel (cf. § 4 de ce chapitre).

1.3.4. La structure du feuillage.

Compte tenu de l'importance de la structure du couvert végétal et de la gestion du feuillage chez la vigne (opérations de rognage et d'effeuillage, combinées à un faible indice foliaire), une réflexion approfondie a été menée sur la pertinence des paramètres gérant ces aspects. En particulier, l'existence d'une végétation secondaire remet en cause le caractère constant de la densité foliaire, et le caractère de liane de la vigne nécessite d'assujettir la forme de la plante aux techniques viticoles plus qu'à la génétique (cf. § 5 de ce chapitre).

1.3.5. Les réserves azotées et carbonées.

La vigne étant une plante pérenne et ligneuse, elle présente une structure, constituée par le tronc et les racines structurales, qui joue un rôle clef dans le stockage des réserves (glucidiques et minérales). Ces réserves vont servir à la plante pour le redémarrage et la gestion de la croissance chaque année. Cependant, cette structure en tant que telle, n'est pas simulée par le modèle, mais représentée par un réservoir non localisé (Brisson *et al.*, 2003). Il était important d'analyser précisément cette représentation mathématique, par rapport à ce que l'on connaît du rôle joué par ces réserves carbonées et azotées (cf. §6 de ce chapitre).

1.3.6. L'azote dans la plante.

La plupart des approches développées sur les besoins en azote des plantes et le diagnostic d'une carence sont basés sur des cultures herbacées en couvert dense. Cependant, la vigne est une culture en rang, pérenne, peu dense. Ceci exige de considérer chaque cep comme une « plante isolée » et de prendre en compte sa capacité de stockage de l'azote dans ses réserves. Une approche théorique est présentée, pour essayer d'expliquer ces caractéristiques (cf. § 7 de ce chapitre).

1.3.7. La durée de vie des feuilles.

La durée de vie des feuilles de vigne est surtout influencée par leur environnement (Champagnol, 1984), contrairement aux hypothèses ontogéniques (la durée de vie d'une feuille étant déterminée génétiquement). Dans le modèle, les deux facteurs coexistent : la sénescence des feuilles est d'abord déterminée par une durée de vie "génétique", puis éventuellement raccourcie par différents stress (hydrique, azoté, trophique). Suite à des observations sur le terrain, nous avons considéré nécessaire d'intégrer aussi un stress photopériodique combiné à l'état trophique de la plante (cf. § 7 de ce chapitre).

1.4. Cadre du travail

Ce travail sur les formalismes s'est fait à la fois sur des bases bibliographiques, qui seront fournies en début de chaque partie, et sur des données expérimentales qui seront détaillées dans le chapitre III. Il a donné lieu à des collaborations avec différents organismes. Certains formalismes ont fait l'objet d'une publication scientifique comme c'est le cas pour le calcul du débourrement de la vigne et la dynamique de la maturation du raisin. Ces deux formalismes seront intégrés directement dans le texte sous forme d'article scientifique. Le formalisme sur le potentiel hydrique de base et la réflexion menée sur la gestion technique du feuillage sont issus d'une collaboration avec l'Institut Technique de la Vigne et du Vin (Nîmes-Montpellier), dans le cadre de stages de fin d'études d'ingénieur. Dans ces deux cas, un résumé détaillé des hypothèses, ainsi que de la méthode utilisée et des résultats obtenus, sera présenté. La gestion de l'azote pour les plantes isolées correspond aux hypothèses énoncées dans le travail de Brisson *et al.*, (2006).

La suite du chapitre va reprendre en détail l'adaptation des formalismes énoncés ci-dessus. Par convention, les paramètres du modèle seront en majuscule-italique (*PARAMETRE*), et les variables d'état du modèle en majuscule (*VARIABLE*), sauf dans les articles, où nous avons dû respecter la syntaxe imposée par les revues.

2. Développement

2.1. Les stades de la vigne dans STICS

Comme nous l'avons dit précédemment, le modèle simule différents stades utiles à la simulation de l'indice foliaire et à la croissance des organes récoltés (Tableau 1).

Certains correspondent à des stades phénologiques couramment observés sur le terrain, et qui peuvent être classifiés en fonction d'une échelle d'observation (dans notre cas l'échelle d'Eichhorn et Lorenz, (1977)). Ces stades sont le débourrement (stade 4) (stade LEV du modèle) et la floraison (stade 23) (stade FLO du modèle). La date simulée par le modèle correspond respectivement à l'observation de 50% des bourgeons débourrés, et 50% des fleurs épanouies dans la parcelle. Il faut souligner que le stade floraison ne joue pas de rôle actif dans la simulation et qu'il est donné juste à titre d'information.

Le modèle calcule également les dates d'autres stades qui sont physiologiquement connus mais rarement ou jamais observés sur le terrain : la fin de la nouaison, qui dans le modèle indique l'arrêt de mise en place des fruits (stade NOU du modèle) ; la levée de dormance (stade FINDORM du modèle) qui va servir à calculer la période de dormance nécessaire avant le débourrement (le stade d'entrée en dormance, DEBDORM, est fixé par l'utilisateur) (cf. article qui suit) ; et l'arrêt de croissance foliaire (LAX). Dans le cas de la vigne, la

croissance végétative peut être quasi-continue si les conditions hydriques et thermiques le permettent (Huglin et Schneider, 1998). Cependant, pour ne pas complexifier le calcul de ce stade, et sachant que le modèle est capable de gérer la capacité de croissance foliaire (et donc son arrêt) en fonction du niveau de stress hydrique, trophique et azoté, nous avons considéré que ce stade correspondait à la date de 50% de véraison. Cette hypothèse est basée sur l'observation selon laquelle l'arrêt de croissance du feuillage se produit autour de la véraison (Champagnol, 1984). En effet, le modèle ne calcule pas la véraison en tant que telle, qui a pourtant l'intérêt de pouvoir être observée. Cependant, le modèle prend bien en compte le changement de dynamique dans la croissance des fruits à ce stade (cf. § 3 article de ce chapitre).

Enfin, le modèle simule également des stades non observables sur le terrain, mais essentiels pour la simulation de la croissance du feuillage et des fruits : l'accélération maximale de la croissance foliaire (stade AMF) correspondant au point d'inflexion de la logistique qui gère la croissance du feuillage (cf. § II.4.3.1) ; le début du remplissage des fruits (stade DRP) qui va déterminer le début de la croissance en biomasse et la formation des fruits ; le début de la dynamique hydrique des fruits (stade DEBDES) qui dans le cas de la vigne coïncide avec le début du remplissage des fruits (cf. article partie 3 de ce chapitre) ; et la maturité physiologique des fruits (stade MAT), définie par l'arrêt de l'accumulation de carbone dans les fruits.

Les temps thermiques entre les différents stades cités ci-dessus sont estimés dans l'article qui suit et dans le chapitre II.

2.2. Calcul de la date de débourrement de la vigne. Le modèle BRIN. (Article)

Cette partie fait l'objet de l'article qui suit en cours de publication : soumis à *Agricultural and Forest Meteorology* (septembre 2005), accepté avec révisions majeures en janvier 2006, corrigé en février 2006, puis finalement refusé par l'éditeur en août 2006. Il a été re-soumis à la revue *Australian Journal of Grape and Wine Research*.

Cet article comporte une partie sur le paramétrage génétique du débourrement qui ne sera pas reprise dans le chapitre III, mais juste rappelée, parmi les modèles présentés, nous avons retenu le modèle BRIN, car il est bien approprié à la vigne et surtout au contexte de notre extrapolation finale

PREDICTIVE QUALITY OF MODELS OF VEGETATIVE BUDBURST IN THE GRAPEVINE (*Vitis vinifera* L.)

Iñaki García de Cortázar Aauri^{1*}, Nadine Brisson¹, and Jean Pierre Gaudillere²

¹ Unité AGROCLIM, INRA, Site Agroparc, Domaine Saint Paul, F-84914, Avignon cedex 9, France.

² UMR Oenologie & Ampélogie, INRA, Domaine de la Grande Ferrade, F-33883, Villenave d'Ornon, France

* Corresponding author Tel.: +33 432722427; Fax: +33 432722362 ; Email address: igarcia@avignon.inra.fr

ABSTRACT

The budburst stage is a key point for grapevine (*Vitis vinifera* L.) phenology varying a lot according to locations and varieties. The objective of the present work was to provide a reliable agro-meteorological model capable to simulate budburst occurrence in grapevine all over France. Ten varieties of grapevine (Cabernet Sauvignon, Chasselas, Chardonnay, Grenache, Merlot, Pinot Noir, Riesling, Sauvignon, Syrah, Ugni Blanc) and five locations were selected: Bordeaux, Colmar, Angers, Montpellier, Epernay. In a first phase we tested the models usually used for grapevine that do not take into account dormancy: number of days since January first (ND), growing degree days (GDD with a base temperature of 10°C) and Rious's model (RIOU). The errors of predictions of these models ranged between 9 and 25 days. In a second phase a new model (BRIN) was studied relying on well-known formalisms for orchard trees and taking into account the dormancy period. Its parameterization was demonstrated to involve genetic-dependant and independent parameters that were properly chosen. The BRIN model demonstrated better performances than the previous grapevine models in terms of prediction of the budburst date. An analysis of the different components of the BRIN formalizations (the calculation of dormancy, the use of hourly temperatures, the base temperature), allowed to point out the reasons for the better quality of BRIN compared to the other initial models. Base temperature is the principal reason of the good simulations and the calculation of dormancy period is not significant to simulate budburst date. Finally, BRIN model and GDD model with a base temperature of 5°C show the best performance. However, BRIN model is more appropriate because it is physiologically meaningful and it makes possible to take into account the effects of climatic change on dormancy period and this impact on the simulation of the budburst date. Finally, the values of the parameters usable in the whole France for each model were provided by variety.

Keywords: *Vitis vinifera* L.; budburst; vineyard; dormancy; temperature response; base temperature; phenological modelling.

INTRODUCTION

Budburst in the grapevine (*Vitis vinifera* L.) defines the beginning of the annual growth cycle and any delay in this stage occurrence has an impact on the whole cycle. To be able to calculate the date of budburst using agro-meteorological models is thus a major challenge for managing vineyards. Hence budburst is critical in the choice of the variety, which is partly characterised by its earliness, and in the siting of the vineyard. This,

for example, is the case of northerly vineyards liable to spring frosts (Moncur *et al.*, 1989). In a situation of climate change, the calculation of the date of budburst of the vine has a real predictive value as an indicator of earliness, and thus of the adaptability of varieties (McIntyre *et al.*, 1982) but also as an initial stage of the growth of the plant in agronomic models, whether they be specific to the grapevine (Gutierrez *et al.*, 1985; Williams *et al.*, 1985a,b; Wermelinger *et al.*, 1991; Bindi *et al.*,

1997a,b) or more generic (Brisson *et al.*, 2002a,b). However, in this predictive context, qualities of spatial and temporal robustness are needed to give meaning to extrapolations of global change scenarios (Chuine, 2000).

There are several scales of phenological observation for the vine (Baggiolini, 1952 ; Eichhorn and Lorenz, 1977 modified by Coombe, 1995), and it is important to define precisely the stage of interest. Galet (1976) defined budburst as the stage corresponding to 50% of the buds of a given vine having burst. He explains meanwhile the difficulties in agreeing on a common stage, which can lead to observational errors in the range of several days. In this study we have chosen to work with stage C according to Baggiolini's scale (which corresponds to stage 4 on Coombe's scale) (Table 1).

Table 1

Vineyard bud burst stages defined by the usual phenological scales

Phenological Scale	Stages
Baggiolini (1952)	B. Budswell or Woolly bud C. Green Tip
Eichhorn and Lorenz (1977) modified by Coombe (1995)	2. Budswell 3. Wool stage, brown wool stage clearly visible 4. Green tip, first leaf tissue visible (Budburst or Bud Break) 5. Bud breaking, first green of shoot visible

Phenological models assume that budburst is regulated by temperature and is induced by a period with chilling temperatures (dormancy) followed by a period with forcing temperatures (post-dormancy) (Chuine, 2000). Physiologically, dormancy corresponds to an inactivity of the meristems placed in conditions in which they would normally be active apart from any correlative inhibition in a favourable environment; it is a period of reduced growth independently of the ecological conditions (Champagnat, 1970; Lang *et al.*, 1987). Sarvas (1974) separates

dormancy in two periods: "rest" period is defined when buds are dormant due to physiological conditions and "quiescence" period when the buds remain dormant due to unfavourable environmental conditions. However, "operational" model to simulate budburst or flowering do not use these more complicated models (Cesaraccio *et al.*, 2004).

Most studies of vine dormancy are old and were carried out under controlled conditions (Pouget, 1963; Nigond, 1967). They pointed out three characteristic periods (Alleweldt, 1963; Pouget, 1963; Nigond, 1967) in our conditions of temperate and Mediterranean climate : 1) the pre-dormancy period, during which the plant acquires its dormancy capacity, takes place in the summer; 2) the period of dormancy ends with the breaking of dormancy, which occurs in winter (Alleweldt, 1963; Pouget, 1963; Nigond, 1967) and 3) the post-dormancy period, during which the buds do not yet develop despite the breaking of dormancy because of unfavourable weather conditions. Although it is possible to demonstrate these different phases in controlled conditions (Pouget, 1963; Bidabe, 1965a,b; Nigond, 1967; Richardson *et al.*, 1974; Gilreath and Buchanan, 1981; Shaultout and Unrath, 1983; Bernstein, 1984), there is no simple non-destructive method which enables them to be observed in the field. For grapevine, Pouget (1972) and Bernstein (1984) showed the importance of exposure of the buds to temperatures below 10°C during a certain period and its effect on the rate of dormancy breaking and budburst. This response to temperature for orchard trees is known as "Cold Actions" (Bidabe, 1965a,b) or "Chilling requirements" (Richardson *et al.*, 1974; Chuine, 2000; De Melo-Abreu *et al.*, 2004; Cesaraccio *et al.*, 2004; Crepinsek *et al.*, 2006).

Several authors have developed methods for calculating the date of budburst of the vine. McIntyre *et al.* (1982), in his phenology study relying on the Californian observatory of the University of Davis (California), simply uses a mean of the number of days between 1st January and budburst to classify 114 varieties. Most other models include the explanatory variable « air temperature » by using either cumulative

temperatures (Williams *et al.*, 1985a,b; Moncur *et al.*, 1989; Wermelinger *et al.*, 1991; Oliveira, 1998) or a logarithmic expression (Pouget, 1968, 1988; Riou, 1994). They are often applied as part of predictive studies (Gutierrez *et al.*, 1985; Williams *et al.*, 1985a,b; Moncur *et al.*, 1989; Riou, 1994; Bindi *et al.*, 1997a,b; Oliveira, 1998; Brisson *et al.*, 2002b). However it often seems to be necessary to adapt the models or methods locally (Pouget, 1988). Moreover, none of these methods takes account of dormancy. The calculations begin on 1st January (Gutierrez *et al.*, 1985; Moncur *et al.*, 1989; Wermelinger *et al.*, 1991; Riou, 1994; Bindi *et al.*, 1997a,b; Oliveira, 1998; Brisson *et al.*, 2002b) or after this date (Williams *et al.*, 1985a,b), implicitly assuming that dormancy has already broken by this date and that the preceding pre-dormancy period has no bearing on the calculation.

There are other models developed for orchard crops and forest species which take account of dormancy to predict the flowering date and budburst (Bidabe, 1965 a,b; Richardson *et al.*, 1974; Chuine, 2000). However these models require more parameters than those mentioned earlier.

Among those models, a preliminary work by Liennard (2002) showed that the combination of Bidabe's model to calculate dormancy break (chilling requirement) and the sum of hourly temperatures to calculate the post dormancy period (forcing requirement) was more effective to calculate flowering for apricot (*Prunus armeniaca* L.) than Bidabe's and Richardson's complete models.

The aim of this work is to provide us with a model to calculate the date of budburst which is robust spatially and which works for a range of varieties representative of French vineyards. For this we have tested i) the various existing models for the grapevine and ii) a model taken from those used in orchard trees growing (it takes into account of dormancy period), made up of a combination of the models of Bidabe (1965 a, b) and growing hourly temperatures. This work uses data from a phenological database applicable to France and statistical methods appropriate for

estimating the parameters and evaluating them as regards their quality and sensitivity.

I MATERIALS AND METHODS

I.1 The database

The data were obtained from the phenological database PHENOCLIM produced by INRA (Domergue *et al.*, 2003) which brings together series of observations for orchard trees and vines and associates them with the temperature records from the appropriate weather stations. For this study we have extracted from PHENOCLIM grapevine budburst data from 1970 to 2002 (Table 2). Those data come from observatories located in five different regions, most of them managed by the French National Agronomic Research Institute (INRA) and one by the Comité Interprofessionnel des Vins de Champagne (CIVC). This regional diversity allows us to cover the climatic variability of French vineyards: Anjou, Champagne, Languedoc, Bordelais, Alsace. More precisely the observatories are located at Angers (47° 7'N, 0° 7'E; 59 m a.s.l.; oceanic climate), Epernay (49° 3'N, 3° 57'E; 71 m a.s.l.; transition oceanic climate), Montpellier (43° 21'N, 3° 31'E; 5 m a.s.l.; Mediterranean climate), Bordeaux (44° 47'N, 0° 34'E; 25 m a.s.l.; oceanic climate with maritime tendency) and Colmar (48° 3'N, 7° 19'E; 193 m a.s.l.; continental climate). Each experimental site is instrumented by a standard weather station (OMM protocol) recording in particular the data useful for our study: daily maximum and minimum temperatures.

The varieties chosen express well the differences in earliness according to McIntyre *et al.* (1982) classification: Cabernet Sauvignon, Chardonnay, Chasselas, Grenache, Merlot, Pinot Noir, Riesling, Sauvignon, Syrah and Ugni blanc.

Table 2

Summary of the database used in our study: years and location (from PHENOCLIM database)

Site Varieties	Angers	Bordeaux	Epernay	Colmar	Montpellier	TOTAL
Cabernet Sauvignon	1982, 1984-1990	1970-1986, 1988, 1995-2002	–	1976 – 1985, 1988 - 1990	1973-1976, 1988-1997, 1999-2002	63
Chardonnay	–	1970 - 2002	1998-2002	1976 – 1985, 1988 - 1990	1974-1976, 1995-2002	60
Chasselas	1982, 1984-1986, 1990	1970-2002	–	1976 – 1985, 1988 - 1994 1996 - 2001	1972-2002	89
Grenache	1982, 1984-1986, 1990	–	–	1977-1985, 1988-1990	1978 - 1986, 1988 - 2002	40
Merlot	–	1970-1982, 1984-2002	–	1976-1985, 1987-1990	1981-1984, 1995-2002	54
Pinot Noir	–	1970-1982, 1984-2002	1998-2002	1976 – 1985, 1988 - 1990, 1992 -1994 1996 - 2001	1973, 1988-2002	72
Riesling	1982-1986, 1990	1970-1982, 1984-2002	–	1976 – 1985, 1988 - 1994 1996 - 2001	1974-1976, 1989, 1996	64
Sauvignon	1982, 1984-1986, 1990	1970-1982, 1984-2002	–	–	1972-1974, 1978 - 2002	63
Syrah	1982, 1984-1986, 1990	1970-1982, 1984-2002	–	1976-1985, 1987-1990	1988-2002	64
Ugni Blanc	1982, 1984-1986, 1990	1970-1982, 1984-2002	–	1976-1985, 1987-1990	–	47

I.2 Phenological models

I.2.a « Number of days » model (ND)

Each variety is characterised by the mean number of days between the first of January and budburst (N_c). The Julian date of budburst (N_{bb}) is thus written very simply as :

$$N_{bb} = N_c \tag{1}$$

I.2.b « Degree-day » model (GDD)

This model (Eq. (2)) is based on the classical degree-day concept, i.e. cumulative mean daily (n) temperatures minus a base temperature (T_0) (assumed constant and acting as the lowest threshold), after 1st January

$$\begin{aligned}
 & \text{if } \left(\frac{T_x(n)+T_n(n)}{2} \right) - T_0 < 0, \quad g_c(n) = 0 \\
 & \text{if } \left(\frac{T_x(n)+T_n(n)}{2} \right) - T_0 \geq 0, \quad g_c(n) = \left(\frac{T_x(n)+T_n(n)}{2} \right) - T_0 \\
 & G_{dc} = \sum_{n=1}^{N_{bb}} g_c(n)
 \end{aligned} \tag{2}$$

where $T_n(n)$ and $T_x(n)$ are the daily minimal and maximal temperatures and G_{dc} is the value at the date of budburst (N_{bb}). A base temperature (T_0) of 10°C, generally accepted for grapevine, has been used (Winkler *et al.*, 1962; Williams *et al.*, 1985; Carbonneau *et al.*, 1992).

I.2.c Riou model (RIOU)

Riou (1994) proposed an improvement to the model of Pouget (1968, 1988). This model is based on the sum of daily actions (A_c) of temperature, different from degree-days. It is based on the hourly temperature calculated from the daily minimum and the maximum temperatures: $T_n(n)$ and $T_x(n)$. In this calculation the daily temperature curve is supposed to be sinusoidal during the daytime and parabolic during the night time (see Fig. 1), taking into account the daylength calculated with the astronomical formulae by Sellers (1965). This hourly temperature ($T(h,n)$, h being the hour and n the day) is used in an exponential type equation, doubly accumulated (Eq. (3)) until obtaining a sum A_c characteristic of the variety :

$$A_c = \sum_{n=1}^{N_{bb}} \sum_{h=1}^{24} \left(e^{0.07T(h,n)} - 1.91e^{-0.126T(h,n)} \right) \quad (3)$$

I.2.d BRIN model

The BRIN model is derived from a combination of two models used in orchard trees growing (Liennard, 2002): the dormancy model of Bidabe (1965 a, b) and the sum of hourly temperatures (Growing Degree Hours) obtained by the estimation method of Richardson et al. (1974). Its main advantage is the introduction of a calculation of the date of the breaking of dormancy in the estimation of the date of grapevine budburst. Moreover the post-dormancy period is evaluated from hourly temperatures.

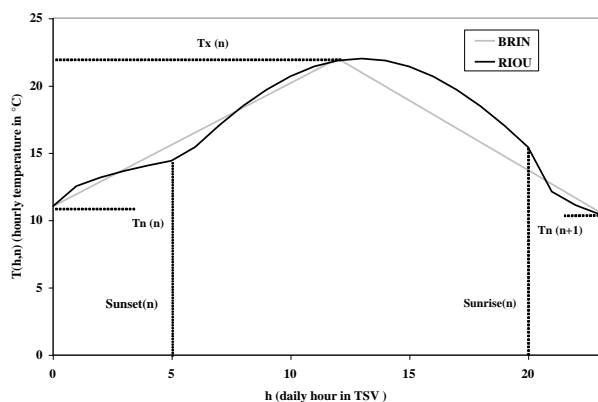


Fig. 1 - Illustration of the two methods of calculating the hourly temperature ($T(h,n)$) from daily thermal data ($T_n(n)$, $T_x(n)$ and $T_n(n+1)$). The method by Riou (1994) requires sunset and sunrise calculations (example of the 20th may in Montpellier). The method of BRIN consists in linear interpolations.

The dormancy model (Eq. (4)) is based on the Q_{10} notion corresponding to an exponential-type response to low air temperatures: an arithmetic progression of 10°C in temperature causes an action with a geometric regression of ratio Q_{10c} . The accumulation of these daily responses (C_c) characterises the plant and enables a date of dormancy break (N_{db}) to be calculated: we have chosen 1st August as the date for starting this accumulation, based on numerous studies (Alleweldt, 1963; Nigond, 1967; Champagnol, 1984; Pouget, 1963, 1988) which show that on

this date the buds become dormant, whatever the variety. Moreover the hot summer period has no influence on the accumulation.

$$C_c = \sum_{n=1^{st} \text{ August}}^{N_{db}} Q_{10c}^{\frac{-T_x(n)}{10}} + Q_{10c}^{\frac{-T_n(n)}{10}} \quad (4)$$

The post-dormancy model (Eq. (5) and Eq. (6)) uses the concept of cumulative degree-hours. The hourly temperature of day n ($T(h,n)$) is calculated very simply by linear interpolation between $T_n(n)$, $T_x(n)$ and $T_n(n+1)$ by assuming a daylength of 12 hours (Fig. 1) (Richardson et al., 1974).

$$\text{if } h \leq 12 \text{ then } T(h,n) = h * \left(\frac{T_x(n) - T_n(n)}{12} \right) \quad (5)$$

$$\text{if } h > 12 \text{ then } T(h,n) = (h-12) * \left(\frac{T_x(n) - T_n(n+1)}{12} \right)$$

Two cardinal temperatures limit the function of the linear response: T_{OBc} and T_{MBc} . The accumulation of hourly temperatures (G_{hc}) begins at the breaking of dormancy (N_{db}) and ends on the day of budburst (N_{bb}).

$$\begin{aligned} \text{if } T(h,n) < T_{OBc} & \text{ then } T(h,n) = 0 \\ \text{if } T_{OBc} < T(h,n) \leq T_{MBc} & \text{ then } T(h,n) = T(h,n) - T_{OBc} \\ \text{if } T(h,n) > T_{MBc} & \text{ then } T(h,n) = T_{MBc} - T_{OBc} \end{aligned} \quad (6)$$

$$G_{hc} = \sum_{n=N_{db}}^{N_{bb}} \sum_{h=1}^{24} T(h,n)$$

We fixed $T_{MBc}=25^\circ\text{C}$ by referring to the work of Pouget (cited by Huglin and Schneider, 1998). For summary, calculation of budburst date with BRIN model is done in two phases: when the sum of Cold Actions arrives at C_c value, we consider this date like the break dormancy date and then the sum of GDH starts until arriving at G_{hc} value (budburst date)

We show in Table 3 a summary of the different parameters to be calculated for each of the models. As regards the BRIN model, we assume for the moment that all these parameters are dependent on the variety.

Table 3

The parameters of the phenological models used. The *c* index means that the parameter is genotype-dependant.

Model	Parameter name	Parameter meaning
Number of days (ND)	N_c	Number of days between January first and bud break date
Growing degree days (GDD)	T_0	Base temperature
	G_{dc}	Cumulative growing degree day between January first and bud break date
Riou's model (1994) (RIOU)	A_c	Cumulative thermal daily actions between January first and bud break date
Combination Bidabe-Richardson (BRIN)	Q_{10c}	Reason of the geometric progression of the thermal dormancy response
	C_c	Cumulative cold actions between August first and the dormancy break
	T_{0Bc}	Base temperature for post-dormancy period
	G_{hc}	Cumulative growing degree hours between the dormancy break and the bud break

I.3 The statistical criteria used

One of the aims of the work is to obtain a single set of parameters which can be used throughout France for each variety, which leads us to ignore any possible regional peculiarities in our analysis and to partition our dataset purely by variety. Giving the heterogeneity of our dataset it did not seem relevant to partition it in two equivalent datasets respectively devoted to parametrization and validation. Consequently we used the approach by Wallach and Goffinet (1987), also detailed in Wallach (2006), giving an estimate of the prediction error (or predictive quality) by cross validation. This estimate is called RMSEP (root mean square error of prediction); it is calculated from the observed dates of budburst (N_{bbo}) and the simulated dates (N_{bbs}) and the result is in days. The cross validation, applied for each variety, is based on a partitioning of the set of N data values into a sub-sample ($N-1$) on which we carry out parameter optimisation and 1 individual (i) on which the resulting model is evaluated. The optimisation method consisted in the Quasi-Newton algorithm (Matlab[®] software) using the least square cost function. The above computations are repeated for the N data. The evaluation (RMSEP) also relies on least square calculations (Eq. (7) and Eq. (8)) summing the N individual evaluation results from the N samplings.

$$N_{bbs}(i) = f(X(i), \theta(i)) \quad (7)$$

$$RMSEP = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (N_{bbs}(i) - N_{bbo}(i))^2} \quad (8)$$

where f represents the model using the vectors of the input data of the individual i , $X(i)$ and of the parameters $\theta(i)$ obtained by optimisation of the sample of $N-1$ data values (N data except i). We obtain the definitive values of the parameters of our model by carrying out an optimisation on the entire sample.

I.4 General Procedure

Earlier we analysed current phenological models for the grapevine (ND, GDD, RIOU) to estimate their predictive quality and the varietal parameter sets by applying the method described above. The parameters obtained were compared with those given by the authors.

Next we compared the BRIN model with the analysed model with the best predictive quality (hereafter called the « reference model »). First we carried out a sensitivity analysis to reduce the number of varietal parameters (Q_{10c} , C_c , T_{0Bc} , G_{hc}).

Lastly we sought an explanation of the performance of the BRIN model by testing several intermediate models by progressive introduction of specific features of BRIN compared with the

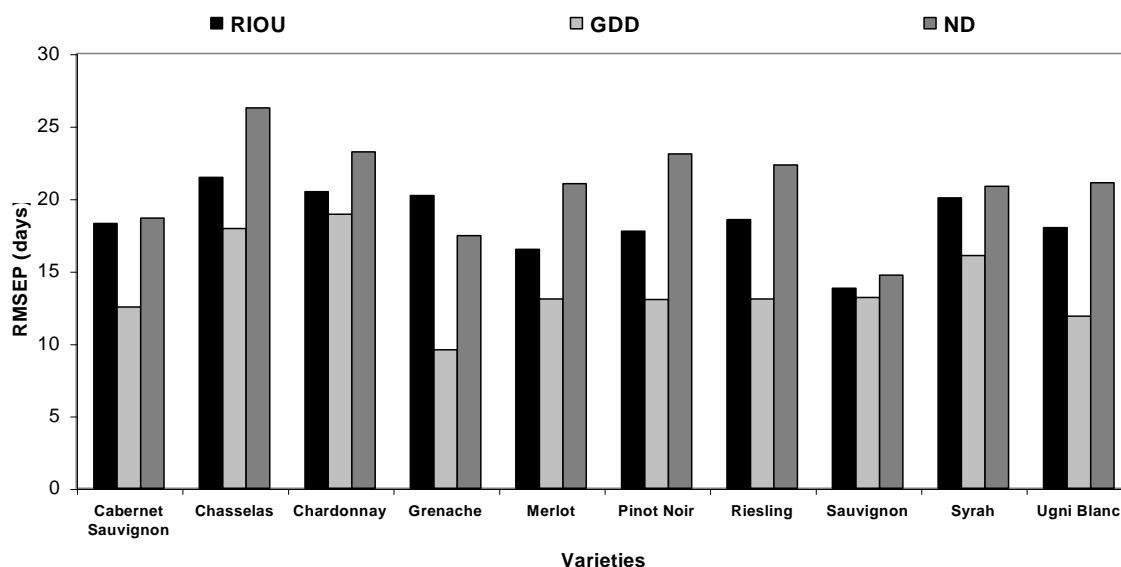


Fig. 2 - Predictive quality (RMSEP) of the 3 vine models (RIOU, GDD and ND) for all the varieties.

reference model. This test was done by an analysis of variance (ANOVA) on the values of RMSEP.

II RESULTS –DISCUSSION

II.1 Test of current vine phenology models

Although the performance of the three current models (Fig. 2) varies between the varieties, the GDD model is the one which behaves best, with a predictive quality varying between 9 and 18 days. The ND model is the worst, with a RMSEP sometimes exceeding 25 days. Besides, we compared our results to those given by the authors of the RIOU model and ND model, in terms of varietal parametrization and earliness classification.

Besides, we compared our results to those given by the authors of the RIOU model and ND model, in terms of varietal parametrization and earliness classification. For the RIOU model (Table 4), we noticed an over-estimate of the parameter value A_c while the ranking of the varieties seems to be respected. This over-estimate may be explained because parameters of original Pouget's model were calculated for stage B (according to Baggioloni's scale) and we calculate stage C. In the same way, the comparison with the classification of McIntyre et al. (1982) of 114 varieties by using the ND model

Table 4

Comparison between the A_c values of the model RIOU provided by the author (Riou, 1994) and the values of the present study.

	A_c Parameter	
	Present study	Riou (1994)
Chardonnay	53	38
Chasselas	61	47
Sauvignon	75	60
Merlot	61	56
Pinot Noir	61	51
Riesling	61	55
Ugni Blanc	65	64
Cabernet Sauvignon	80	72
Grenache	76	59
Syrah	67	53

Table 5

Comparison between the precocity classification proposed by McIntyre *et al.*, (1982) and our classification relying on PHENOCLIM data, both using the model ND.

	Classification according to precocity	
	Phenoclim	McIntyre (1982)
Chardonnay	1	1
Chasselas	2	3
Sauvignon	3	4
Merlot	4	6
Pinot Noir	5	2
Riesling	6	5
Ugni Blanc	7	8
Cabernet Sauvignon	8	7

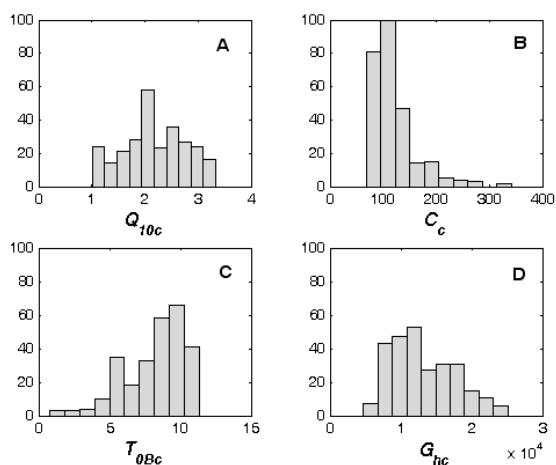


Fig. 3- Histograms of the values obtained for the BRIN model parameters after optimization from 30 bootstrap samples per variety (300 values per parameter in total): A for Q_{10c} ; B for C_c ; C for T_{0Bc} ; D for G_{hc} .

Table 6

Linear correlations between the 4 parameters of the model BRIN. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$.

	Q_{10c}	C_c	T_{0Bc}	G_{hc}
Q_{10c}	1			
C_c	0.41 ***	1		
T_{0Bc}	-0.28 ***	-0.27 ***	1	
G_{hc}	-0.12 *	-0.46 ***	-0.17 **	1

Table 7

Mean, standard deviation and coefficient of variation of the 4 parameters of the model BRIN

	Q_{10c}	C_c	T_{0Bc}	G_{hc}
Mean	2.17	119	8.19	13236
Standard Deviation	0.59	43.99	2.13	4520.10
Variation Coefficient	0.27	0.37	0.26	0.34

Table 8

RMSEP values of the model BRIN obtained for chosen temperatures and using $Q_{10} = 2.17$.

Temperature	0	2	4	5	6	8	10
RMSEP	11.05	11.21	11.06	11.02	10.96	11.01	11.27

demonstrates a convergence for very early and very late varieties (Table 5) but there is divergence for varieties of intermediate earliness. However the conditions of the study were somewhat different, since McIntyre only used data from a single site and the differences in earliness between the intermediate varieties were small (1 or 2 days).

In view of its performance the GDD model was used as the reference model for the rest of the study.

II.2 Parametrisation and evaluation of the BRIN model

The number of parameters in the BRIN model is disadvantageous for generalising its use. Furthermore there appear to be correlations between these parameters, which should enable us to retain only two of the four varietal parameters: one for the dormancy phase and the other for the post-dormancy phase.

To make this choice properly, we needed to rely not only on one value of the parameters but on a distribution of the population of those parameters. Consequently we used the technique of the bootstrap (Manly, 1991) creating 30 different samples. The principle of bootstrapping is sampling with replacement, allowing approximating what would happen if the population was resampled.

The data populations were grouped by variety and on each sample we performed the optimisation of the four parameters.

The distribution of the parameters, averaged over all varieties, is shown in Fig. 3. The correlation coefficients between the parameters (Table 6) are not very high, but they are very significant, justifying fixing some of them. The statistics of the parameters (Table 7) show that it is the accumulations (C_c and G_{hc}) which have the highest coefficients of variation. It is on them that we have chosen to focus the peculiarities of the varieties and so we will fix the parameters Q_{10c} and T_{0Bc} for all of the varieties. Hereafter they will be called Q_{10} and T_{0B} . The value of Q_{10} is the

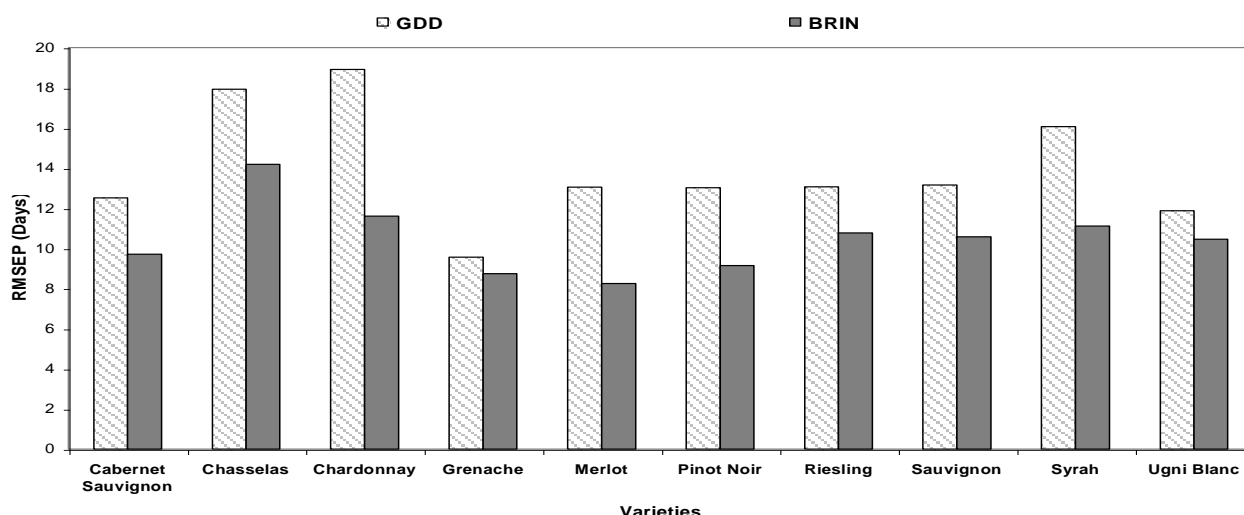


Fig. 4 - Comparison between predictive qualities (RMSEP) of the reference model (GDD) and the model BRIN (values in table 11).

mean value of the distribution (Table 7): 2.17. As regards T_{OB} , the distribution appears multimodal and to estimate the parameter we have tested the model for values from 0 to 10°C, having fixed Q_{10} . The results (Table 8) suggest three possible values: 5, 6 and 8°C. We have chosen $T_{OB} = 5^\circ\text{C}$, since several authors have shown that the base temperature for budburst is around this value for several varieties (Moncur *et al.*, 1989; Huglin and Schneider, 1998).

Having fixed the values of Q_{10} and T_{OB} , we estimated the predictive quality of BRIN (Fig. 4). The result was a significant improvement in the prediction of the date of budburst compared with the reference model GDD (RMSEP from 8 to 14 days). Moreover the course of development

between dormancy break and 1st January, expressed in growing degree hours or in growing degree days, cannot be ignored (Table 9) as it is very variable between sites and years for a given variety. BRIN provides extra information, the date of dormancy break, which always occurs before 1st January, which to some extent enables one to verify the hypothesis that dormancy is always broken by that date.

II.3 Search for an explanation of the performance of the BRIN model

The differences between BRIN and the reference model involve i) taking into account the dormancy period when calculating the date of budburst, instead of an arbitrary start on 1st

Table 9

Outputs variables of the model BRIN in relation with the dormancy break (N_{bd}).

Variety	Growing Degrees Hours between N_{bd} and January First	Growing Degree Days between N_{bd} and January First	N_{bd}
	Mean (S.D.)	Mean (S.D.)	Mean (S.D.)
Cabernet Sauvignon	774.5 (± 606.0)	17.2 (± 33.6)	15 th December (± 13)
Chasselas	717.3 (± 566.1)	16.1 (± 29.7)	15 th December (± 13)
Chardonnay	982.2 (± 645.8)	21.7 (± 40.2)	10 th December (± 12)
Grenache	731.2 (± 572.1)	9.0 (± 39.6)	13 th December (± 15)
Merlot	786.3 (± 555.0)	16.6 (± 34.4)	14 th December (± 12)
Pinot Noir	800.7 (± 597.8)	16.1 (± 34.4)	12 th December (± 13)
Riesling	783.8 (± 542.1)	17.2 (± 26.3)	12 th December (± 12)
Sauvignon	802.6 (± 660.0)	25.3 (± 24.1)	19 th December (± 9)
Syrah	1039.7 (± 673.6)	24.0 (± 38.4)	10 th December (± 12)
Ugni Blanc	1494.3 (± 711.6)	31.2 (± 51.1)	2 nd December (± 10)

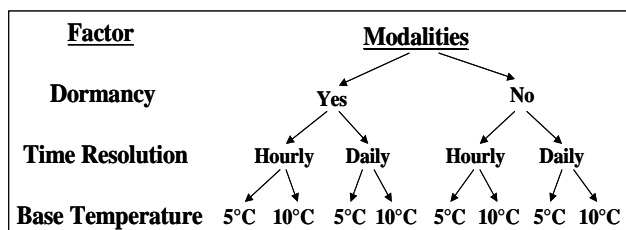


Fig. 5 - Synthesis of the 8 combinations used to construct intermediate models between GDD and BRIN : the upper line corresponds to BRIN and the lower line corresponds to GDD.

January, ii) use of hourly temperatures for the course of post-dormancy development instead of the mean daily temperature and iii) the use of a base temperature of 5°C instead of 10°C. Those three components can be regarded as three various options for set up a budburst phenological model. Consequently we constructed 8 intermediate models between the reference model and BRIN by introducing these three options independently of each other (Fig. 5).

Each model, being characterized by a combination of the three options, provide values of predictive quality (RMSEP), that were analysed with an analysis of variance using each option as an explicative factor. This analysis was performed both at the level of the variety and at the level of the whole specie in order to test the influence of the genetic factor.

The results (Table 10) show the dominant role

Table 10

Results of the analyse of variance (probability of the Fischer test) of the predictive quality of the model BRIN (RMSEP) taking into account the three factors of the model construction (Fig. 5) plus the genetic factor. *: P < 0.05; **: P < 0.01; ***: P < 0.001.

Factors	Dormancy Yes/No	T ₀ 5 or 10°C	Daily/Hourly	Variety
Cabernet Sauvignon	0.629	0.000***	0.013*	
Chasselas	0.707	0.006**	0.063*	
Chardonnay	0.304	0.004**	0.060*	
Grenache	0.270	0.003**	0.042*	
Merlot	0.220	0.000***	0.082*	
Pinot Noir	0.568	0.002**	0.044*	
Riesling	0.074*	0.006**	0.165	
Sauvignon	0.054*	0.016*	0.229	
Syrah	0.535	0.000***	0.011*	
Ugni Blanc	0.509	0.001**	0.194	
Toutes	0.658	0.000***	0.000***	0.000***

of the « base temperature » factor, significant at the 1% probability threshold (Table 10) for nearly all varieties. On the other hand the « dormancy » factor is not significant, while the use of hourly temperatures has a significant effect (5 and 10%) for certain varieties. Generally speaking, the « variety » factor is the most significant, showing, unsurprisingly, that differentiation of parameters by variety is essential and that there cannot be any « generic » parametrisation for the grapevine (*Vitis vinifera* L.).

Likewise the predictive quality of the date of budburst is not affected by the start of the calculation, i.e. whether dormancy break is estimated or fixed arbitrarily on 1st January, in the conditions covered by our database. On the other hand the use of hourly temperatures slightly improves the result. The GDD model (with a base temperature of 5°C) and BRIN model gives the best results.

However the date of the start of the calculation, although arbitrary, remains a decisive factor in obtaining a good simulation of budburst: the use of 1st February as a start date for the accumulations (unpublished data) results in a substantial drop in predictive quality, demonstrating the influence of cumulative temperatures during the month of January.

Table 11

Values of parameter sets and RMSEP for the various models used in the study: RIOU, ND, GDD (with $T_0=5^\circ\text{C}$ and $T_0=10^\circ\text{C}$) and BRIN.

	RIOU			ND		GDD (10°C)		BRIN			GDD (5°C)	
	Obs.	A_c	RMSEP	N_c	RMSEP	G_{dc}	RMSEP	C_c	G_{hc}	RMSEP	G_{dc}	RMSEP
Cabernet Sauvignon	63	80	18.3	97.8	18.6	52.5	12.5	106.8	9169.4	9.7	318.6	9.8
Chasselas	89	61	21.5	83.3	26.3	37.2	17.9	106.3	6971.8	14.2	257.8	14.6
Chardonnay	60	53	20.5	77	23.2	33.3	18.9	101.2	6576.7	11.6	220.1	12.6
Grenache	40	76	20.2	98.9	17.4	57	9.6	102.2	9174.3	8.8	321.3	8.2
Merlot	54	61	16.5	86.8	21	38.7	13.1	105.7	7595.5	8.2	265.3	7.4
Pinot Noir	72	61	17.7	87	23.1	38.6	13	103.6	7468.9	9.1	258.4	9.8
Riesling	64	61	18.6	92.2	22.3	39.7	13.1	108.2	7471.3	10.8	257.7	9.2
Sauvignon	63	75	13.8	84.7	14.7	50.2	13.2	103.9	8352.8	10.6	294.4	10.9
Syrah	64	67	20	86.9	20.8	39.2	16.1	99.2	7818.6	11.1	265.3	11
Ugni Blanc	47	65	18	96.8	21.1	48	11.9	94.3	9145.4	10.5	284.7	8.8

On the other hand, if one changes the climatic conditions, substituting warmer winter temperatures, the prediction of dormancy break can play an important role because it can be deferred, even after 1st January. We have shown this in a study of the effect of climate change on grapevine phenology, using BRIN (García de Cortázar *et al.*, 2005).

III CONCLUSIONS

This detailed analysis of agro-meteorological models for calculating the date of grapevine budburst has enabled us to draw up an assessment of their performance by making use both of models typically used in viticulture and of a model created for orchard trees growing, BRIN. By using the latter we have explored the value of introducing the calculation of dormancy, which has not previously been done for the vine. When applied over a wide scale, the classical vine models proved less accurate than BRIN, although the latter owes it better performance to the base temperature chosen (5°C) rather than to the

introduction of dormancy. Consequently the replacement of the base temperature in the GDD model would already allow a notable improvement in routine estimates. However, BRIN model is physiologically meaningful and it enables the study of climate change taking into account the dormancy period in grapevine.

We think however that for extrapolating models to different climatic conditions from those of our database it is important to retain the simulation of the date of dormancy break.

Thanks to the well-endowed PHENOCLIM database, we were able to calculate parameter sets for each of the models tested for the whole of France, thus assuring a certain robustness to the proposed values (Table 11).

Nevertheless one should not forget that our approach is purely mathematical and statistical and that although we have made use of elements of grapevine physiology, we have no way of controlling the precision of our estimates of the date of dormancy break.

La bibliographie de cet article se trouve intégrée dans la bibliographie générale de la thèse.

3. Dynamique de la croissance des baies (Article)

Cette partie fait l'objet de l'article qui suit en cours de publication : soumis à Annals of Botany (juillet 2006), en cours de révision après retour en octobre 2006.

Asynchronous Dynamics of Grapevine (*Vitis vinifera*) Maturation

IÑAKI GARCIA DE CORTAZAR ATAURI^{1*}, NADINE BRISSON¹, OLIVIER JACQUET²

and JEAN-CHRISTOPHE PAYAN³

¹ Unité Agroclim, INRA, Site Agroparc, domaine St-Paul, F-84914, Avignon cedex 9, France. ² Chambre d'Agriculture Vaucluse, 2260, Route de Grès, 84100 Orange France. ³ ITV-France – Unité de Nîmes, Domaine Donadille, 30230, Rodilhan, France

- *Background and Aims* An analysis of the processes involved in the maturation of grapes (*Vitis vinifera* L.) was carried out on a macroscopic scale. It is mainly concerned with the dynamics of the evolution of the dry matter and of the water and their asynchrony.

- *Methods* A methodology based on the measurement of the density of the berries was used, providing information on the dry matter, water content and the distribution of the populations of berries during maturation, in addition to the usual phenological observations. The main experiment was carried out in the vineyards of the Rhone valley on the "Grenache N" and "Syrah" varieties.

- *Key Results* There is a relationship between the Brix degree and the water content of a berry which is robust and identical for all varieties. The asynchronous character of maturation is confirmed in every case. The dynamics of grape maturation depend on the air temperature and the variety. The rate of dry matter accumulation in the berry is considerable after veraison (onset of ripening) and reaches a plateau at the end of growth. Its normalisation as a function of thermal time and final maximal dry weight for the year provides a single relationship for the varieties "Syrah" and "Grenache Noir" showing that at veraison, the dry weight of a berry is in the order of 40% of its final dry weight. The dynamics of the water content of the berry is monotone, in contrast to the quantity of water. It is dependent on the water supply to the plant (expressed as the crop temperature by the STICS model) and the air temperature.

- *Conclusions* This work has allowed us to draw up a conceptual framework of the evolution of dry matter and water in a population of grape berries, which could be incorporated into a model of vine growing.

Key words: *Vitis vinifera* L., berry density, phenology, dry mass, water content, temperature, growing degrees days, maturity, berry growth, growth phase, crop temperature.

INTRODUCTION

In the field of viticulture, the notion of maturity is rather vague (Riou, 1994) since the final product sought is not the same for all vineyards. In fact one cannot separate maturity and quality. This quality depends on a balance, specific to the vineyard, between sugars, acids, aromatic constituents and phenolic compounds. However, although the quality is a notion which is complex to define, we can agree that the sugar content is a good indicator of it, and is also a good indicator of maturity (Champagnol, 1984 ; Riou, 1994). This is why one can find phenological definitions of maturity : "stage 38" on the scale of Eichhorn and Lorenz (1977) or "stage M" on the scale of Baggioloni (1952), assumed to be the moment when the berries reach a sugar concentration of 20% (% Brix).

However such definitions are inadequate to help to logically fix the date of harvest which, according to Huglin and Schneider (1998), should really integrate the dynamics of maturation for reasons which are both biochemical and to do with the synchrony of the processes within the plant, the berry or the bunches. In fact recent studies tend to show that the uniformity of the harvest is an important element in the quality of the wine, significant variability being a possible source of imbalance or modification of the "style" of the wine (Deloire *et al.*, 2005). On the other hand there is no work indicating that complete homogeneity (all the berries at the same stage of maturity) always results in a quality gain but a careful characterisation of the variability of the harvest might provide material for this debate. Differences in level of maturity have been found due to the orientation of the plot (Pieri and

Ferraud, 2005) and to poor water and nutrient supply (Coombe and Dry, 1988 ; Champagnol, 1984), structure of the vineyard in relation to the wind (Tarara *et al.*, 2005), variability of the soil within the field (Ojeda *et al.*, 2005), method of pruning (Deloire *et al.*, 2005), etc. Thus, in order to clearly understand grape maturity, one has to understand well the different phases and processes which define it.

The growth of the grape berries follows a double sigmoid curve which is divided into three phases (Champagnol, 1984 ; Matthews and Anderson., 1988; Ollat, 1997; Ojeda *et al.*, 1999, 2001, 2002; Coombe and McCarthy, 2000 ; Matthews and Shackel 2005) : phase I is a phase of cell multiplication and enlargement; phase II being an intermediate phase of slowing down of cell division; and phase III is a phase purely of cell enlargement. These phases occur during the period from flowering to maturity, and the veraison stage plays an important role as an indicator in the dynamics of the growth of the berry thus defined.

Phases I and II occur before veraison. Phase I corresponds also to a significant accumulation of organic acids (especially malic and tartaric) and the moisture status of the plant during this period has a major impact on the weight at veraison and the final weight of the berries (Ollat, 1997; Coombe and McCarthy, 2000; Ojeda *et al.*, 2001, 2002), which are related to the number of cells formed in the pericarp of the berry (McCarthy, 2000). Phase II, which ends at veraison, is dependent on the variety and the soil and weather conditions (Matthews and Shackel, 2005). Staudt *et al.* (1986) did not observe this phase on the cultivars "Bacchus" and "Madeleine" (*Vitis vinifera* L. cultivars "Bacchus" and "Madeleine"), while Ojeda *et al.*, (2001) showed that severe water shortage can shorten or suppress it. It is also during the flowering-veraison period that the trophic competition between the leaves and the fruit is greatest, playing a determinant role on the final weight of the berries (Ollat, 1997). In parallel with the growth of the berries (understood to be in fresh weight), a fall in their water content (%) is observed from fruit setting (Matthews and Anderson, 1988). The water balance in the berry

during this period is defined partly by the xylem and phloem incoming flows, and partly by transpirational losses (Greenspan *et al.*, 1996 ; Ollat, 1997 ; Matthews and Shackel, 2005), implying that water stress can influence the water content of the berry (Ollat., 1997; McCarthy, 1999 ; Ojeda *et al.*, 2002). As to the length of time between flowering and veraison, several studies show that the temperature sum between these two stages is relatively constant between sites for the variety Syrah (*Vitis vinifera* L. cultivar "Syrah") (McCarthy, 1999; Ojeda *et al.*, 2001). However in most studies this period is expressed as a number of days (Staudt *et al.*, 1986; Matthews and Anderson, 1988; Coombe, 1992; Ollat, 1997; McCarthy, 1997, 1999; McCarthy and Coombe, 1999; Ojeda *et al.* 1999, 2001, 2002; Coombe and McCarthy, 2000; Matthews and Shackel, 2005), making it difficult to make comparative analyses.

Phase III of the growth of the berry extends from veraison to harvest and begins with a change in the colour of the berry (at veraison). It is characterised by cell enlargement and a big accumulation of sugars (hexoses, glucose and fructose) concomitant with a fall in the concentration of organic acids and a softening of the tissues. Except in the case of very vigorous vines, vegetative growth seems to cease at veraison (Champagnol, 1984), although a relationship between the end of this growth and the duration of maturity has not been established. The effect of post-veraison water stress on the final fresh weight of the berries is disputed : there is none according to McCarthy (1997, 1999, 2000), contrary to the observations of Ojeda *et al.*, (2001, 2002), which are explained by the lesser degree of cell elongation. On the other hand Coombe and McCarthy (2000) show that a loss of volume may occur at the end of maturation (from 18-20% Brix) by a blockage of the phloem flow combined with a rapid loss of water by transpiration, thereby provoking an increase in the sugar concentration (% Brix).

To all these factors one must add the asynchronous character of the maturity of the different berries within the bunch or on a given

plant. Coombe (1992) found differences in maturity of up to 23 days between two bunches on the same plant which could be attributed, among other things, to the spread of fruit setting which affects the duration of veraison.

The objective of the work presented in this paper is to describe and understand the processes determining the maturation of the grape berries : growth, development, evolution of water content, asynchrony. It is based on an experimental methodology of monitoring maturation adapted especially for the grape and applied to several varieties in the vineyards of the Rhone valley and Burgundy : *Vitis vinifera* L. cultivars "Grenache N", "Syrah", "Pinot Noir" and "Chardonnay".

MATERIALS AND METHODS

1. Experimental design

The experiment was carried out from 2003 till 2005 on grapevine plots situated in the vineyards of the valley of the Rhone and Burgundy (France), using various methods listed in Table 1. In every case the practices conform with the techniques traditionally practised in this region. The weather data come from an automated weather station (WMO standards) sited on the plots.

The temperature and rainfall patterns of the growing seasons (April – October) of the three years compared with the mean for 1990-2000 are shown in Table 2. It is apparent that 2003 was particularly hot and dry, and that the years 2004 and 2005 were rather dry.

2. Measurements

As regards the phenological development of the berry, three stages have been identified according to the scale of Eichhorn and Lorenz (1977) : flowering (stage 23), veraison (stage 35) and maturity (stage 38). The flowering and veraison stages were observed in the usual way as corresponding to 50% of the flowers of berries having reached that stage (Williams *et al.*, 1985; Carbonneau *et al.*, 1992; Riou, 1994). We have defined the maturity stage as corresponding to a concentration of 24% Brix. This is a definition used in the Rhone valley vineyards, giving a wine of 14° alcohol.

Moreover we have estimated the "fruit set" stage (stage 27) from a non-linear extrapolation of the relationship between berry weight and temperature sum, the fruit setting stage being defined as the abscissa at zero weight (Figure 6).

TABLE 1. Description of different experiments

Vineyard	Year	Experiment	Description					Particular practices		Number of measurements
			Cultivar	Pruning	Rootstock	Location	Orientation	Density (plant m ²)	Irrigation	
Rhone valley	2003	SS03	Grenache N	Cordon Royat	R 110	44°04'-5°03'	North - East	0.36	No	8
		SI03	Grenache N	Cordon Royat	R 110	44°04'-5°03'	North - East	0.36	232 mm between flowering and harvest	7
	2004	SGr04	Grenache N	Cordon Royat	R 110	44°04'-5°03'	North - East	0.36	No	7
		SSy04	Syrah	Cordon Royat	RU 140	44°04'-5°03'	South - East	0.36	No	7
	2005	PGr04	Grenache N	Cordon Royat	Fercal	44°10'-4°08'	North	0.44	No	8
		PSy04	Syrah	Cordon Royat	161 - 49C	44°10'-4°08'	North	0.44	No	8
		BGr04	Grenache N	Cordon Royat	RU 140	43°47'-4°24'	North - East	0.39	No	3
		BSy04	Syrah	Cordon Royat	RU 140	43°47'-4°24'	North - East	0.39	No	3
		SGr05	Grenache N	Cordon Royat	R 110	44°04'-5°03'	North - East	0.36	No	10
	Burgundy	2005	SSy05	Syrah	Cordon Royat	RU 140	44°04'-5°03'	South - East	0.36	No
PGr05			Grenache N	Cordon Royat	Fercal	44°10'-4°08'	North	0.44	No	11
PSy05			Syrah	Cordon Royat	161 - 49C	44°10'-4°08'	North	0.44	No	11
Burgundy	2005	MPiN05	Pinot Noir	Double Guyot	SO4	47°16'-4°59'	East	1	No	3
		MChy05	Chardonnay	Double Guyot	SO4	47°16'-4°59'	East	1	No	3
		MbPiN05	Pinot Noir	Double Guyot	SO4	47°2'-4°49'	East	1	No	3

TABLE 2. Environmental conditions in the various experiments. Comparison with the mean conditions in the period 1990-2002 (April – October).

		Daily mean temperature			Rainfall
		Mean	Min	Max	Sum of rainfall
	Period 1990 -2002	18.8 ± 0.4	13.3 ± 0.4	25.0 ± 0.4	498 ± 118.4
Rhone Valley (Avignon Meteorological Station) 43°55', 4°50'	2003	20.5	14.4	27.5	361
	2004	19.4	13.6	25.9	312
	2005	19.5	14.1	25.8	407
	Period 1990 -2002	15.3 ± 0.4	9.9 ± 0.5	21.2 ± 0.5	473.9 ± 92.5
Burgundy (Bretenieres Meteorological Station) 47°19', 5°2'	2005	16.3	10.7	22.5	394

TABLE 3. Salt concentration of the different saline solutions.

Age class	Salt concentration
CA1	< 60g/L
CA2	60 – 75 g/L
CA3	75 – 90 g/L
CA4	90 – 105 g/L
CA5	105 – 120 g/L
CA6	120 – 135 g/L
CA7	135 – 150 g/L
CA8	150 – 165 g/L
CA9	165 – 180 g/L
CA10	> 180 g/L

To characterise the state of maturation of the berries, we have used a technique, inspired by Singleton (1966), which enables berries to be separated according to their density. In this way groups of berries of equivalent density are made up by putting them into saline solutions of increasing concentration, sorting being effected by the flotation of the berries which is characteristic of their stage of maturity. Sampling consisted of 12 bunches per plot, sampled once a week between veraison and harvest (in the morning) on 12 different plants at each sampling. The berries were de-stalked by cutting the base of the pedicel so as to limit the effects of osmosis between the berry and the saline medium. A preliminary study had determined the appropriate salinity scale to the range of sugar concentration in the grape according to 10 classes, interpreted as "age classes" (Table 3) since every berry passes through each of the classes in its passage from veraison to maturity. Once classified, the berries were counted,

weighed then dried for 120 hours in an oven at 70°C before being weighed again. Just before drying, on a sub-sample of 10 berries taken at random in each class, we measured the % Brix with a refractometer (Fabre RCT 0-22 AP, Magenta, France).

In order to find the start of the dynamics, in 2005 we took four extra samples (of 200 berries each) between flowering and veraison, on which were measured just the fresh and dry weights.

The plots of BGr04, BSy04 MPiN05, MChy05, MbPiN05 were only used for densimetric measurements.

3. Calculation of weather variables

The time scale used is a temperature sum (Growing Degree Days – G_{DD}) from flowering.

$$G_{DD} = \sum_{n=F}^H (T_m(n) - T_b) \quad (1)$$

where T_m is the mean air temperature on day n ; T_b is the base temperature for development, in our case 10°C (Winkler *et al.*, 1962; Carbonneau *et al.*, 1992); F is the flowering date and H is the harvest date at maturity.

The evolution of the water content of the berries was related to the temperature of the crop, estimated on a daily scale with the crop model STICS 6.0 (Brisson *et al.*, 2003) in "forcing" mode of the leaf area index (Ripoche *et al.*, 2001), the parameters characterising the water conditions of the soils having been carefully measured. An energy balance was made (Brisson *et al.*, 2002b)

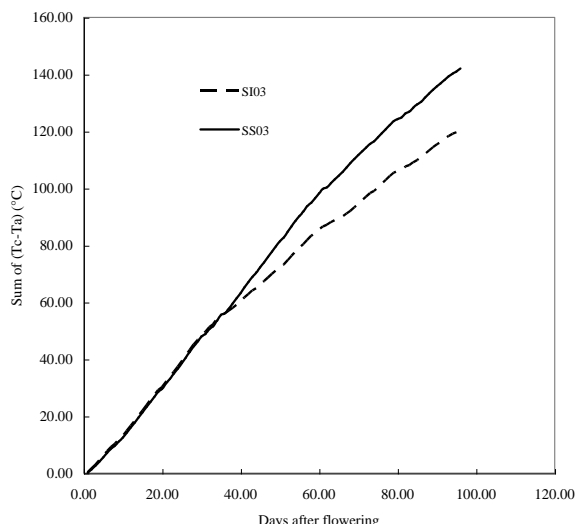


FIG. 1. Graphical representation of the cumulative difference between the crop temperature (T_c) and the air temperature (T_a) for the plots SS03 and SI03, from flowering to maturity

using the measured weather variables, the calculated evapotranspiration and the structure of the described vegetation. Thus the crop temperature is a synthesis of the hydric state of the plant, the crop cover and the weather. Figure 1 shows the cumulative temperature difference between the crop and the air for the conditions SS03 and SI03 from flowering.

4. Statistical analysis

A Fischer’s test was done to test the significant differences between the means of the values of the phenological stages studied : flowering – fruit set, fruit set – veraison, veraison – maturity. This calculation was done using Microsoft Excel (Microsoft Corporation, USA). The graphical interface of the same software was also used to obtain the values of the regression coefficients of the different relationships shown in the « Results and Discussion » section.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Meaning of densitometry

For each age class, represented by a saline concentration, there is a corresponding sugar concentration and mean water content of the berries (Table 4). The linear regression between these two variables (Figure 2) is very good for the whole

TABLE 4. Mean values of solute concentrations (% Brix) and water content (%) for each of the age classes.

Age class	Mean° BRIX	Mean Water Content (%)
CA1	7.73 ± 0.97	88.72 ± 1.6
CA2	9.63 ± 0.94	86.58 ± 1
CA3	12.22 ± 0.8	84.19 ± 0.72
CA4	14.99 ± 0.46	82.13 ± 0.72
CA5	17.36 ± 0.59	80.30 ± 0.68
CA6	19.61 ± 0.72	78.33 ± 0.58
CA7	21.67 ± 0.92	76.31 ± 0.71
CA8	24.21 ± 0.46	74.07 ± 0.58
CA9	25.99 ± 0.41	72.44 ± 1.16
CA10	28.74 ± 0.21	72.09 ± 2.95

range of maturity and is independent of the variety, so that the following relationship can be proposed :

$$W_c = -0.8408C_s + 94.712 \tag{2}$$

where W_c is the water content of a berry (%) and C_s is the % Brix of the berry. This relationship, simply by measuring the % Brix, provides the dry weight of the berries from the fresh weight. It enables one to separate the two opposing trends of accumulation of biomass and the evolution of water content, both pre-requisites for modelling the growth of the berry.

2. Berry population

First we analysed the experimental data in terms of the dynamics of the berry population (Figure 3). The results confirmed those of Singleton *et al.*, (1966) and Coombe (1992), i.e. that at a given date one finds berries of several “age classes”, confirming that the berry population matures asynchronously. However there exists a dominant "age class" (containing the largest number of berries) which evolves during maturation from the first to the last class. The asynchronous nature of maturation applies to a number of age classes which seems to be fairly constant at around 4 (Figure 4). Nevertheless we noticed in experiments PGr04 and PSt04 (Figure 3c) that the expected intervals for the majority

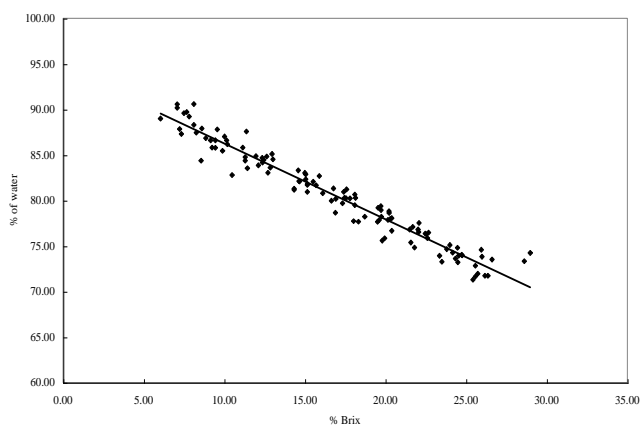


FIG. 2. Relation between solute concentration (% Brix) and water content (% water) in a grape berry. The regression coefficient is calculated for all the cultivars and all the experiments. Regression coefficient $R^2 = 0.9493$

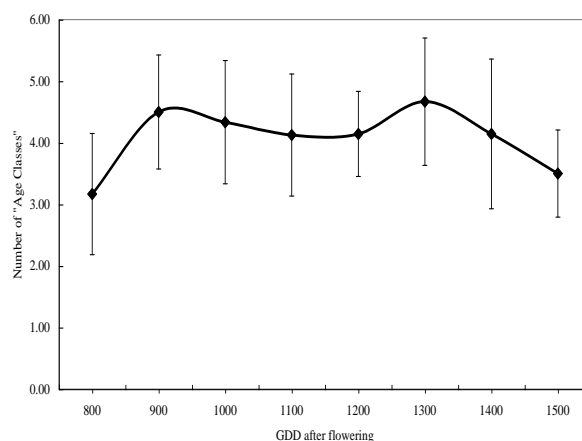


FIG. 4. Distribution of the number of classes as a function of temperature since flowering.

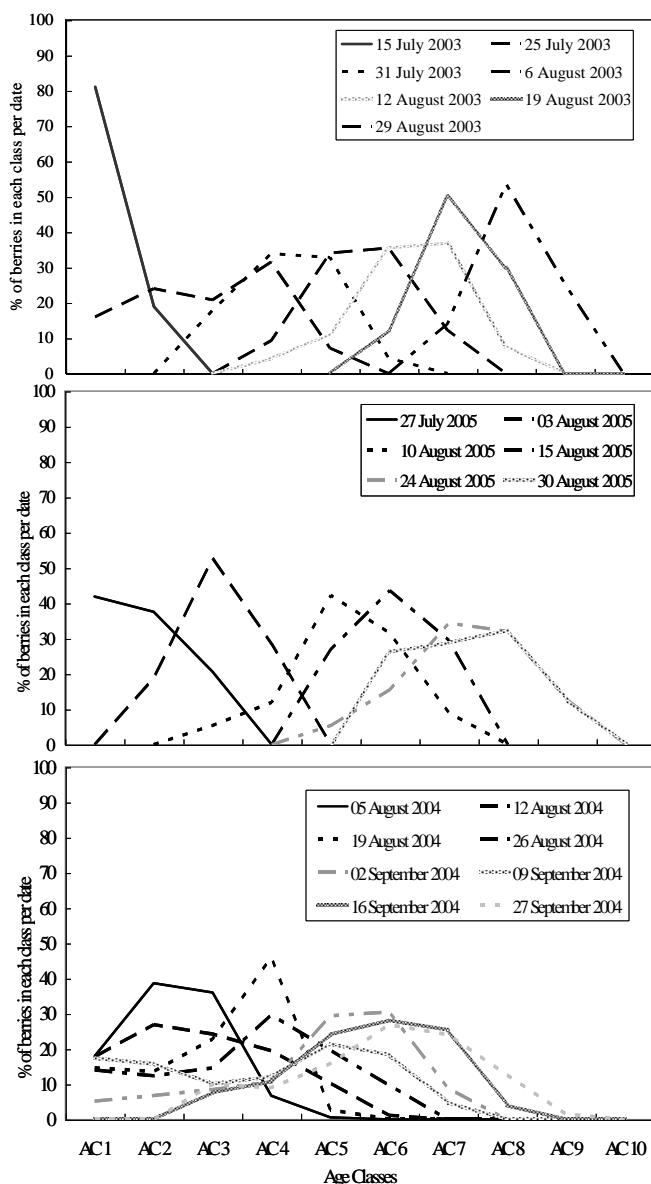


FIG. 3. Evolution of berry populations in plots SI03 (A), SSy05 (B), PGr04 (C).

class did not appear clearly. This anomaly could be explained by a malfunctioning of the dynamics of the maturity of the berries due to potassium deficiency, revealed by regular leaf analysis. In fact potassium deficiency is known to delay berry growth (Champagnol, 1984; Coombe and Dry, 1988), causing berries to become stuck in certain “age classes”. This results in a broader spread of maturation. On the other hand this variability in the densitometry pattern of the berry population, being a sign of nutritional problems, could be used as an indicator of the quality of the harvest.

3. Study of a particular berry

Using the preceding results, to follow the dynamics of a berry, we have chosen to study the majority age class in terms of both dry biomass and water content. This analysis was done for the sites "Serres" (SS03, SI03, SGr04, SGr05, SSy04, SSy05) and "Piolenc" (PGr04, PGr05, PSy04, PSy05).

As for the phenological development of the berry, the four stages identified (flowering, fruit set, veraison and maturity) were converted to G_{DD} and summarised in Table 5 for the two varieties "Grenache N" and "Syrah". It appears that all the periods are significantly different for the two varieties studied, although, in view of the estimated nature of the "fruit set" stage, the interpretation of the values involving this stage is more difficult. This confirms the varietal character

TABLE 5. Values of temperature sums obtained for the different phenological period between flowering and harvest. The value of "fruit set" stage (stage 27) was made using a mathematical approach, as the stage was not observed. A Fischer' test was done to compare the phenological stages of the two varieties.

Average Temperature Sum (above 10°C)		Grenache N	Syrah
Flowering - Fruit set	Mean	133.39 a	131.81 b
	Std. Dev.	12.35	8.98
	CV	0.09	0.07
Fruit Set - Veraison	Mean	760.86 a	616.58 b
	Std. Dev.	49.56	29.97
	CV	0.07	0.05
Veraison - Harvest Day	Mean	548.32 a	581.76 b
	Std. Dev.	73.67	98.08
	CV	0.13	0.17
Flowering - Harvest Day	Mean	1446.86 a	1338.35 b
	Std. Dev.	106.66	121.25
	CV	0.07	0.09

of development (McIntery *et al.*, 1982 ; García de Cortázar, 2006). The values obtained for the variety Syrah agree with those of Ojeda *et al.* (2001) and confirm field observations which show that "Syrah" has an earlier veraison than "Grenache N", although the latter matures earlier than "Syrah".

The increase in the dry weight of the berry (Figure 5a) is rapid after veraison, and then seems to reach a plateau at the end of growth. It is thus a classic growth curve, which only a few authors have demonstrated for dry weight (Staudt *et al.*, 1986 ; McCarthy and Coombe, 1999). If one normalises the axes by the maximum of temperature sums for the abscissa and of dry

weight for the ordinates, we observe a regrouping of the measurements which can be represented as a single curve. The normalisation of the axes depends entirely on the variety and it is the thermal time needed between flowering and maturation. We have measured in field the maximal thermal time needed for this period: 1534 G_{DD} for "Grenache N" and 1477 G_{DD} for "Syrah". The normalisation of the ordinates is justified by the results of several authors (McCarthy, 1997; Ollat, 1997; Ojeda *et al.*, 2001) according to whom the maximum weight of a berry, dependent both on the genetic potential and the soil and weather conditions, is determined at veraison. The data obtained in 2005 for the period from flowering-veraison allowed us to estimate the evolution of the dry biomass during the growth of the berry (flowering-harvest). By making the same assumptions as before, we made a double normalisation as a function of cumulative G_{DD} until maturity and of the final dry weight of a berry (Figure 6A and B), which also resulted in a single relationship for the two varieties and confirmed the value of using a temperature sum time scale (Ojeda *et al.*, 2001).

Figure 6B shows clearly the double sigmoid curve mentioned in the literature, but in this case for dry weight. Veraison corresponds to the moment when growth rate is maximal ; this is another definition of the veraison already observed earlier (Coombe and McCarthy, 2000).

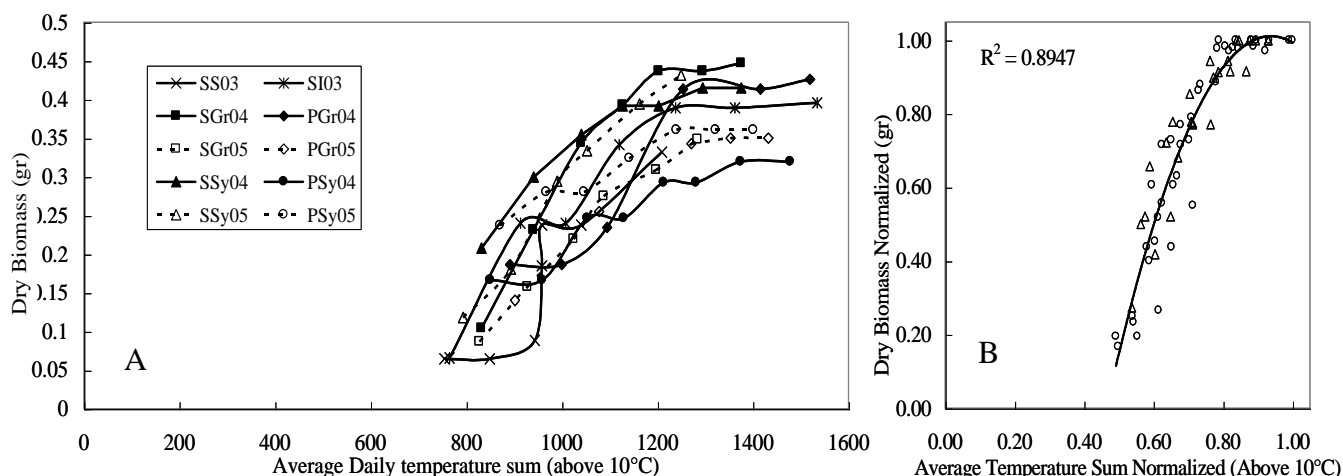


FIG. 5A Evolution of the dry matter of the median berry class from veraison as a function of the temperature sum for all the experiments. **5B** Normalisation of temperatures and of dry biomass for the two varieties "Grenache N", "Syrah".

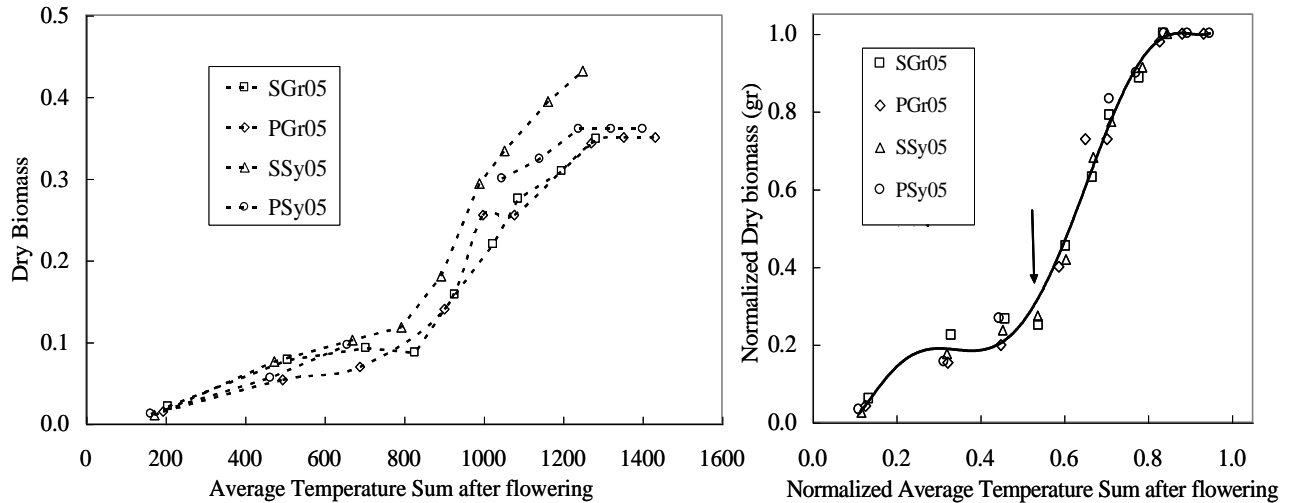


Fig. 6A. Description of the curve of dry matter from flowering as a function of cumulative GDD. **6B** Normalisation of the various curves and estimation of a curve to describe the dynamic.

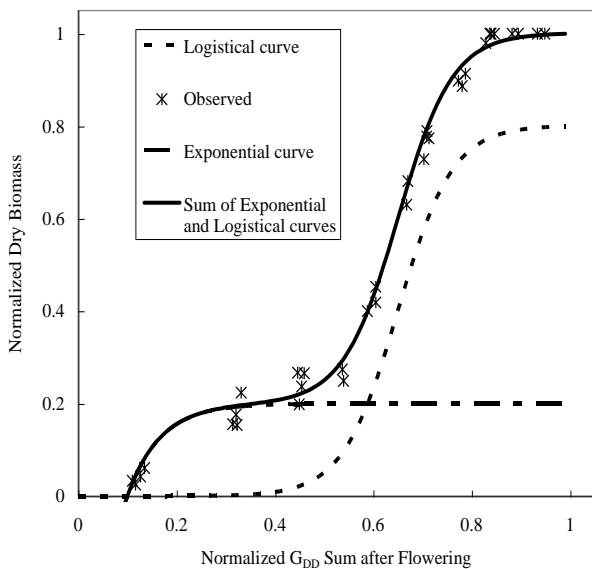


Fig. 7: Scheme of normalised evolution of dry biomass in a berry as a function of cumulative temperature (GDD). Description of exponential curves (cell multiplication) and logistic curves (cell enlargement and elongation). The parameter values which fit the curve to the observed points are E_c (15), E_{mg} (0.2), L_c (18) and L_{mg} (0.65).

To describe this evolution we have defined two complementary dynamics : (i) an exponential curve to describe cell multiplication and (ii) a logistic curve to describe cell enlargement (Figure 7). The combination of these two curves will enable us to obtain the double sigmoid defined earlier. The theoretical normalised equation (as a function of development and of dry biomass) is the following :

$$M_{dn} = E_{mg} \left(1 - e^{-(E_c (G_{DDn} - 0.1))} \right) + \frac{A_{fx}}{1 + e^{-(L_c (G_{DDn} - L_{mg}))}} + B_{fx} \quad (3)$$

where M_{dn} is the value of normalised dry weight (g) ; G_{DDn} is the temperature sum normalised since flowering ; L_c and L_{mg} are the curvature and the point of maximum growth in biomass respectively of the logistic; E_c and E_{mg} are the curvature and point of maximum growth of biomass respectively of the exponential ; and A_{fx} and B_{fx} are the coefficients allowing the normalisation (equations 4 and 5):

$$A_{fx} = \frac{(1 - E_{mg} (1 - e^{-(E_c)}))}{\frac{1}{1 + e^{-(L_c(1-L_{mg}))}} - \frac{1}{1 + e^{(L_c L_{mg})}}} \quad (4)$$

$$B_{fx} = - \frac{A_{fx}}{1 + e^{(L_c L_{mg})}} \quad (5)$$

Non-linear fitting of these equations to the data from our experiments enabled us to estimate the values of the parameters E_c (15), E_{mg} (0.2), L_c (18) and L_{mg} (0.65) (Figure 7).

Also, as shown by Ollat (1997), McCarthy (1997) and Ojeda *et al.*, (2001), the final weight of the berry is predetermined at veraison, the relationship established in figure 5B or the more complete one in figure 6B could be used as a predictive tool by making use of the weight of the berry at veraison, which is about 40% of the final dry weight.

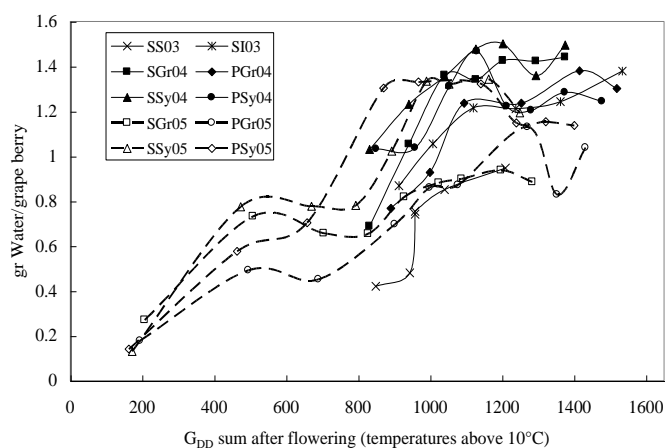


FIG. 8 : Evolution of the quantity of water as a function of time for the various treatments.

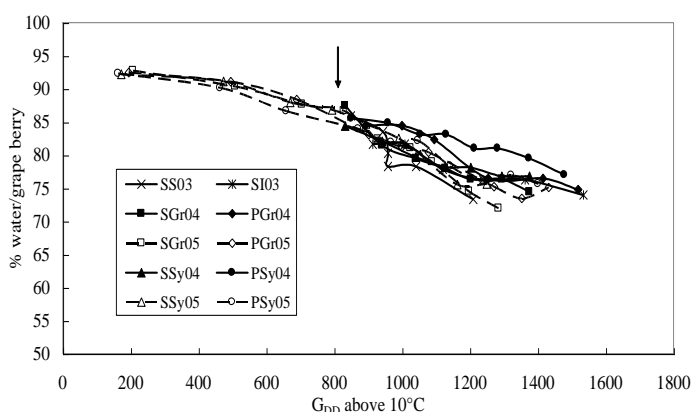


FIG. 9. Evolution of water content in a berry as a function of cumulative temperature.

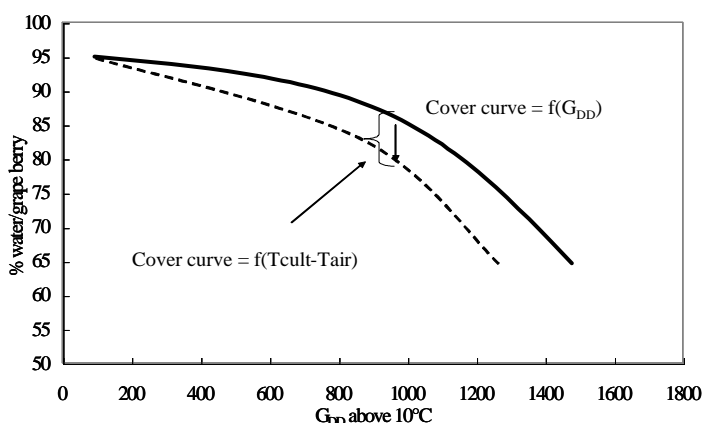


FIG. 10. Evolution of water content in a berry as a function of cumulative temperature (GDD) and the effect of crop temperature as the main accelerator of the fall in water content

The final dry weight of the berry is reached before maturity (at 80% of the flowering-maturity period), at 1158 and 1070 G_{DD} for "Grenache N" and

"Syrah" respectively. After this date the fluctuations in the weight of the berry are mainly due to variations in its water content.

The curve of the quantity of water in the berry (Figure 8) seems more erratic than that of the dry weight, being heavily dependent on both the variety and the soil and weather conditions of the field. If water content is expressed as a percentage (Figure 9), the evolution is more regular, beginning clearly at fruit set, as mentioned by Matthews and Anderson (1988).

We have tried to break down this evolution into two components, one of which would be related to the age of the berry and the other would depend on the water supply to the plant. We have assumed that the first component corresponds to the curve envelope of the measured points and that the water component is linked to the difference between the air temperature and the crop canopy temperature (Figure 10).

We determined the curve envelope by non-linear fitting of a second degree polynomial to the highest values. Then the relationship with the temperature elevation of the canopy is found by linear regression on the residues against the values of the curve envelope. The resulting relation allowing the calculation of the water content of the berry is as follows :

$$W_c = -0.000005(G_{DD}(n))^2 - 0.0032G_{DD}(n) + 93.752 - 0.0458\left(\sum_F^n T_c(n) - T_a(n)\right) \quad (6)$$

where W_c is the water content of the berry (%); G_{DD} is the temperature sum (base 10) on day n since flowering; T_c is the crop temperature ($^{\circ}C$) on day n calculated by STICS; and T_a is the air temperature ($^{\circ}C$) on day n . Figure 11 (A,B) shows that this representation corresponds to the observations.

CONCLUSION

Based on the work of Singleton et al., (1966), densitometry has enabled us to analyse in detail the dynamic evolution of the populations of grape berries by proposing the notion of age classes. This method turns out to be very useful for the study of

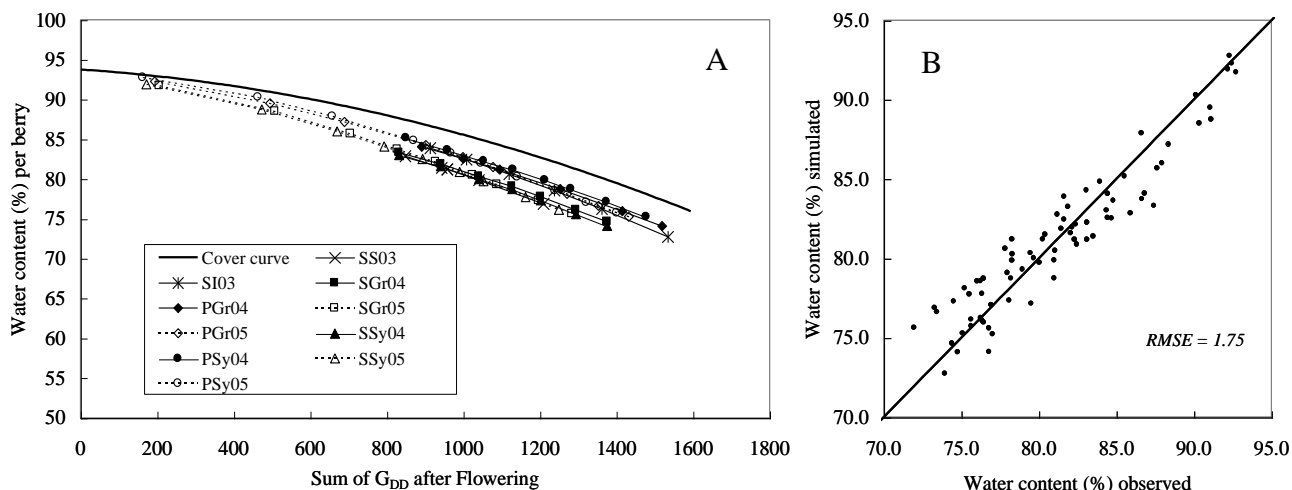


FIG 11 A. Simulation of the evolution of the water content by applying the equation 6. **11 B** Graph comparing simulated water content with the observations, with a RMSE of 1.74%.

berry heterogeneity during their maturity, showing that the number of age classes at a given moment is relatively constant. We have found a very stable relationship between sugar concentration (% Brix) and water content (% water) which can be used experimentally to estimate the dry weight of the berries.

The study of the combined dynamics of the evolution of dry matter and the water content of the grape provides a coherent synthesis of several processes, some of which were mentioned in the literature on the evolution of fresh weight: growth of the grape following a double sigmoid; the temperature sum since flowering giving a good prediction of growth; the key role of veraison as an indicator stage for the double dynamic of berry growth and the steady fall in water content from fruit setting. These elements have enabled a formalisation of grape maturation, which, by the use of double normalisation, makes it possible to

easily calculate the growth of an individual berry. Regarding water content, two factors seem to be superimposed: the first being linked to the age of the berries and the second to the moisture conditions prevailing during maturation. These results confirm the effect of water stress on the quality of the grape in terms of its sugar content. However the need to use a model (in this case STICS) to estimate the crop temperature makes it difficult to use the established formulation routinely.

This work has provided a conceptual framework to understand and represent the dynamics of the growth of a population of grape berries. It could be integrated into a model of grapevine growing (Williams *et al.*, 1985; Bindì *et al.*, 1997 a, b; Brisson *et al.*, 2002a, García de Cortázar *et al.*, 2004) to improve the simulation of yield elaboration. However for the sake of generality, the results of this study need to be extrapolated to other varieties.

La bibliographie de cet article se trouve intégrée dans la bibliographie générale de la thèse.

Nous avons intégré les résultats issus de cette expérimentation dans le modèle. La force des puits fruit (FPFT) en fonction de l'âge des baies est à présent la dérivée de la fonction proposée dans l'article (combinaison d'une courbe exponentielle et d'une logistique). Elle commence à partir du stade DRP et non à partir de la floraison. Cela a modifié les valeurs des paramètres qui décrivent la courbe de croissance (cf.§ II.4.8.2.).

La base de temps de la dynamique de déshydratation est différente dans le modèle de celle utilisée dans l'article : l'unité de l'un est le nombre de jours, tandis que celle de l'autre est la somme de températures. Dans le cadre expérimental testé (vignobles de Côtes du Rhône et Languedoc) ces deux bases de temps donnaient les mêmes résultats. Cependant, utiliser une base temporelle différente pour la déshydratation (journalière) et pour la croissance en matière sèche (thermique) a permis de générer des résultats plus contrastés en terme de teneur en eau de la baie à la récolte, résultats qui ont été validés par la suite à l'échelle de l'ensemble du vignoble français (cf.§ II.4.8.3.). Cette "teneur en eau" définit également une teneur en sucre (et donc en alcool) utilisable pour déclencher la récolte dans le modèle.

4. Introduction du calcul du potentiel foliaire de base

L'objectif du calcul du potentiel foliaire de base est de fournir une variable de sortie comparable à des mesures afin de contrôler le fonctionnement hydrique du modèle et de l'inverser pour pouvoir obtenir les informations des différents paramètres du système sol-racines (Payan *et al.*, 2005), parfois difficiles d'accès dans les sols viticoles : densités et profondeur racinaires, caractéristiques hydrodynamiques des sols, teneur en cailloux.

4.1. Intérêt du potentiel de base

Le potentiel hydrique foliaire est mesuré pour caractériser l'état hydrique de la plante. Sa mesure s'obtient par la technique de la chambre à pression (Scholander *et al.*, 1965). Il s'agit d'estimer, à l'aide de la pression d'un gaz neutre appliqué sur une feuille, la capacité des cellules à retenir l'eau. Moins il y aura d'eau libre dans la plante, plus la pression nécessaire pour la faire sortir sera forte. Le résultat est exprimé en bar ou en MPa, toujours en valeur négative. Pour le potentiel de base, cette mesure s'effectue en fin de nuit, ce qui permet de s'affranchir des conditions climatiques du jour de mesure. Pendant la nuit, la plante retrouve un équilibre de son état hydrique en relation avec l'eau du sol, car on considère que la transpiration nocturne est nulle (Katerji et Hallaire, 1984). Le fait que le potentiel de base fournisse une bonne représentation de la disponibilité de l'eau du sol pour la plante, ainsi que sa robustesse, son utilisation généralisée, et la possibilité de le calculer au pas de temps journalier, font de lui un indicateur très intéressant dans le cadre de son utilisation dans les modèles de cultures (Lebon *et al.*, 2003 ; Gruber et Schultz 2005).

Mais il existe d'autres indicateurs du stress hydrique (de Munter, 2004), mesurés soit au niveau du sol, soit au niveau de la plante. En ce qui concerne le sol, ces indicateurs s'appuient sur des mesures d'eau dans le sol par des méthodes gravimétriques, neutroniques ou tensiométriques. Cependant, la complexité des sols viticoles, la difficulté dans beaucoup de cas de pouvoir mettre en place des systèmes de mesures à cause de la présence trop importante des cailloux et la méconnaissance de la

profondeur réelle de la zone d'absorption racinaire, ont détourné les professionnels de la vigne de ce type de mesures.

Les mesures plante sont, soit des variables d'état hydrique (potentiel hydrique foliaire), soit des variables physiologiques très sensibles au déficit hydrique (conductance stomatique, débit de sève, température foliaire, C_{13}, \dots) (Ojeda, 1999 ; Riou et Lebon, 2000 ; Van Leeuwen *et al.*, 2001 ; de Tessieres, 2002 ; Gaudillere *et al.*, 2002). D'autres potentiels foliaires que le potentiel de base sont utilisés. Le potentiel de feuille peut être mesuré tout au long de la journée, et il reflète la dynamique de l'assèchement dû à la transpiration et/ou à la limitation de l'absorption hydrique. Il dépend de la demande climatique du jour. Le potentiel de tige est mesuré au midi solaire sur la face ombragée des feuilles préalablement ensachées pour les mettre à l'obscurité, et afin qu'elles ne transpirent pas. Il renseigne sur la capacité de la plante à conduire l'eau du sol à l'atmosphère. Plusieurs travaux ont porté sur la comparaison des différents potentiels hydriques foliaires (Choné *et al.*, 2000, 2001a, b ; Yuste *et al.*, 2004 ; Carbonneau *et al.*, 2004 ; Gruber et Schultz, 2005).

4.2. Formalisme d'introduction du potentiel foliaire de base dans le modèle STICS

Ce travail a fait l'objet d'un mémoire fin d'étude d'ingénieur (de Munter, 2004) que j'ai co-encadré, et dont je résume ci-après les principaux éléments.

Le calcul du potentiel foliaire de base proposé (Équation 1), permet de tenir compte de l'humidité à l'échelle de la couche et de la densité racinaire présente dans celle-ci. Il a déjà été utilisé avec succès pour les cultures herbacées annuelles (soja, blé) (Brisson *et al.*, 1993). Des relations plus empiriques, reliant directement l'eau dans le sol au potentiel de base, ont été également proposées dans la littérature (Pellegrino, 2003 ; Lebon *et al.*, 2003 ; Pellegrino *et al.*, 2004 ; Schultz et Lebon, 2005).

Équation 1

$$PSIBASE = \sum_{i=1}^{OBSTARAC} \frac{LRACZ(i) PSISOL(i)}{\sum_{i=1}^{OBSTARAC} LRACZ(i)} \text{ si } PSISOL(i) > -15 \text{ bars}$$

où PSIBASE est le potentiel foliaire de base simulé ; LRACZ est la densité racinaire de chaque couche ; PSISOL est le potentiel hydrique du sol. On fait l'hypothèse que la contribution d'une couche de sol à PSIBASE est proportionnelle à la densité de racines de cet horizon et au potentiel hydrique du sol de ce même horizon. Le formalisme introduit une condition pour calculer PSIBASE : les racines présentes dans une couche de sol où PSISOL est inférieur à - 15 bars ne participent pas à l'alimentation hydrique de la plante et n'interviennent donc pas dans le calcul du potentiel foliaire de base (de Munter, 2004). Ceci nous permet de prendre en compte les résultats d'Archer et Ameglio (1996), qui montrent que le potentiel de base est en équilibre avec le potentiel matriciel des horizons les plus humides explorés par le système racinaire. Pour calculer PSISOL, il faut utiliser la teneur en eau du sol simulée par STICS. La relation entre ces deux grandeurs est la courbe de rétention et nous utiliserons l'approximation exponentielle que proposent Clapp et Hornberger, (1978) (Équation 2).

Équation 2

$$PSISOL(i) = PSISAT \left(\frac{HUR(i)}{WSAT(i)} \right)^{-B}$$

où PSISAT et B sont les paramètres de la relation ; WSAT est la teneur en eau à saturation de la couche, calculée en fonction de la densité apparente DA (Équation 3) ; HUR est teneur en eau réelle.

Figure 4. Schéma de distributions des horizons du sol, pour obtenir les trois horizons utilisés dans l'optimisation

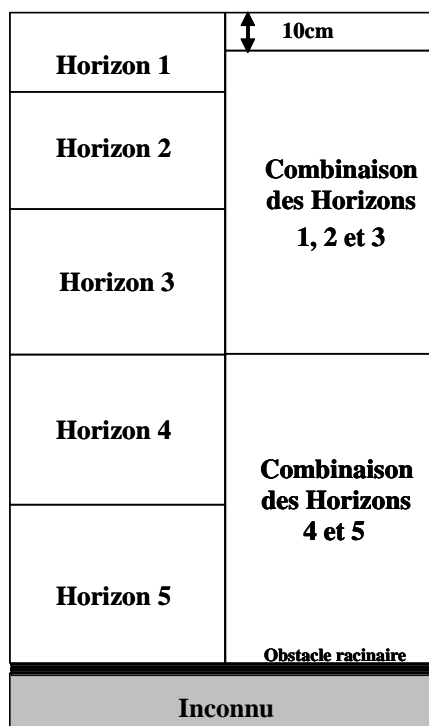


Tableau 2. Paramètres nécessaires pour décrire le sol dans le modèle STICS. Les paramètres en gras ont été utilisés dans notre étude. Les autres ont été mesurés ou estimés.

Paramètre	Définition
<i>ARGI</i>	teneur en argile de la couche de surface en %
<i>NORG</i>	teneur en azote organique dans l'horizon d'humification (de la surface du sol à profhum) en % pondéral (ordre de grandeur 0.05 à 0.3 %)
<i>CALC</i>	teneur en calcaire dans la couche de surface en %
<i>ALBEDO</i>	albédo du sol nu à l'état sec (SD)
<i>Q0</i>	limite d'évaporation de la phase potentielle d'évaporation du sol (mm)
<i>PROFHUM</i>	profondeur équivalente d'humification (cm) entre la profondeur de labour et 60 cm.
<i>CONCSEUIL</i>	concentration minimale du sol en NH4 (kgN ha-1 mm-1)
<i>PH</i>	pH
<i>RUISOLNU</i>	fraction de la pluie ruisselée (par rapport à la pluie totale) en conditions de sol nu (entre 0 et 1)
<i>CODEFENTE</i>	option création d'un compartiment supplémentaire dans le bilan hydrique pour les sols argileux gonflants : oui (1), non (0)
Par horizon	
<i>OBSTARAC</i>	Obstacle à l'enracinement
<i>EPC</i>	Epaisseur des horizons
<i>HCCF</i>	Humidité à la capacité au champ (g g-1) de la terre fine des horizons
<i>HMINF</i>	Humidité minimale exploitable par la plante (g g-1) de la terre fine des horizons
<i>DAF</i>	Densité apparente de la terre fine des horizons
<i>CAILLOUX</i>	Teneur volumique en cailloux des horizons (%)
<i>TYPECAILLOUX</i>	Type de cailloux ¹ : 1=calcaires B1, 2=calcaires B2, 3=calcaires L, 4=caillasses L, 5=graviers m, 6=silex, 7=granits a, 8=calcaires J, 9=autre1, 10=autre2.
<i>INFIL</i>	infiltrabilité à la base de chaque horizon (mm j-1)

¹ Le choix du type de cailloux implique dans le modèle la définition de deux paramètres : 1) humidité à la capacité au champ des cailloux et 2) la masse volumique (apparente) des cailloux

Équation 3
$$WSAT(i) = \frac{1}{DA(i)} - \frac{1}{2,66}$$

La teneur en eau pondérale de la terre fine à des potentiels définis est mesurée en laboratoire (ou calculée à partir des règles de pédotransfert). Deux des références de la courbe de rétention sont présentes dans le fichier sol de STICS : l'humidité à la capacité au champ (*HCCF*) qui correspond à l'humidité à -0.3 bars et l'humidité au point de flétrissement permanent (*HMINF*) qui correspond à -15 bars (on considère que l'eau qui reste dans le sol n'est plus disponible pour la plante).

A partir de ces deux mesures disponibles dans le modèle, les paramètres *PSISAT* et *B* de l'équation 2 peuvent être calculés de manière analytique pour chaque horizon considéré (de Munter, 2004) (Équation 4).

Équation 4
$$B = \frac{\log\left(\frac{-0.3}{-15}\right)}{\log\left(\frac{HMINF(i)}{HCCF(i)}\right)} \quad \text{et} \quad PSISOL = -15 \left(\frac{HMINF(i)DA(i)}{WSAT(i)} \right)^B$$

4.3. Test du formalisme en mode inverse

4.3.1. Objectifs du test

Il s'agit de tester la pertinence du calcul de la variable potentiel de base, pour inverser le modèle et en déduire les caractères du système sol-racines, inaccessibles à la mesure. Ces caractéristiques sont parfois estimées à partir de l'observation d'une fosse pédologique (observations visuelles dépendantes de l'observateur) : taux de cailloux dans les différents horizons, densité de racines de chaque horizon et obstacle racinaire. D'autres peuvent être mesurées plus précisément (en laboratoire ou sur le terrain) : l'humidité à la capacité au champ et au point de flétrissement de la terre fine et la densité apparente. Cependant, il peut exister des différences entre les données observées dans le laboratoire et *in situ*. Ainsi, la représentativité de la position de la fosse dans la parcelle peut aussi avoir un rôle important.

4.3.2. Méthodologie

- *Reconstitution du sol en 3 horizons*

Pour d'avantage prendre en compte la répartition de racines dans le sol et diminuer le nombre de paramètres à optimiser, les sols ont été « reconstruits » à partir des données originelles en seulement 3 horizons (Figure 4). Parmi les caractéristiques permanentes du sol de STICS (Tableau 2), nous avons choisi de faire porter l'inversion du modèle sur les paramètres influençant le plus le fonctionnement hydrique du système. Il s'agit de l'obstacle à l'enracinement, des humidités caractéristiques et du pourcentage de cailloux dans chaque horizon, auxquels nous avons ajouté le profil des densités racinaires en début du cycle.

- *Forçage du LAI*

De plus, pour tester le formalisme, nous avons utilisé le mode « feuille » du modèle (Ripoche *et al.*, 2001 ; de Munter, 2004), basé sur le « forçage » par des valeurs de LAI observées. Le LAI est

Tableau 3. Description des parcelles utilisés dans l'analyse du formalisme sur le potentiel hydrique foliaire de base.

	Serres	Sauteyrargues	Puymeras	Le Bolchet
Localisation	Serres (84)	Sauteyrargues(34)	Puymeras (84)	Caissargues (30)
Cépages	Grenache N	Grenache N	Grenache N	Grenache N
Porte-greffe	110 R	110 R	110 R	RU 140
Année de plantation	1984	1987	1984	1991
Ecartement rang	2.40 * 1.10	2.35 * 1.10	2.30 * 1.10	2.25 * 1.10
Orientation des rangs	23° (N)	45° (N)	50° (N)	5° (N)
Type de taille	Double cordon de Royat	Double cordon de Royat	Double cordon de Royat	Double cordon de Royat
Modalité	non irrigué et irrigué	non irrigué	non irrigué	non irrigué
Années d'étude	2002, 2003	2001, 2002, 2003	2002	2004

Tableau 4. Gamme de variation des paramètres et classification des paramètres selon leur sensibilité (de Munter, 2004)

Paramètres	Variation	Gamme de variation de la valeur de RMSE	MD	Classement
Obstacle racinaire	± 10 cm	0.5 - 0.21	0	1
Teneur en cailloux	± 10 % « absolus » (du volume du sol)	0.29 - 0.23	-0.2	6
Type de cailloux	Il existe 10 type de cailloux différent selon leur masse volumique et leur humidité à la capacité au champ	0.39 - 0.22	-0.1	5
HCCF	± 10 % « absolus » (de l'humidité pondérale)	0.3 - 0.2	0	2
HMINF	± 10 % « absolus » (de l'humidité pondérale)	0.34 - 0.2	-0.1	4
Densité de racines initiales	± 0.05 cm racines / cm ³ de sol	0.43 - 0.19	-0.1	3

interpolé entre les dates de mesures disponibles à l'aide d'un modèle simple de cinétique (Baret, 1986). En forçant le LAI, on maîtrise la demande climatique au niveau de la plante.

- *Jeu de données*

Cette étude a été réalisée sur un groupe de parcelles avec un seul cépage, Grenache N (*Vitis vinifera* L.) (Tableau 3) : Le Bolchet 2004 ; Serres sec 2002 et 2003 ; Sauteyrargues 2001, 2002 et 2003. Ces parcelles ont fait l'objet d'un suivi expérimental du potentiel de base de la floraison à la récolte. Les sols sont caractérisés à la fois par des mesures en laboratoire et par l'observation de fosses pédologiques. Les indices foliaires ont été estimés à partir des mesures géométriques (de Munter, 2004).

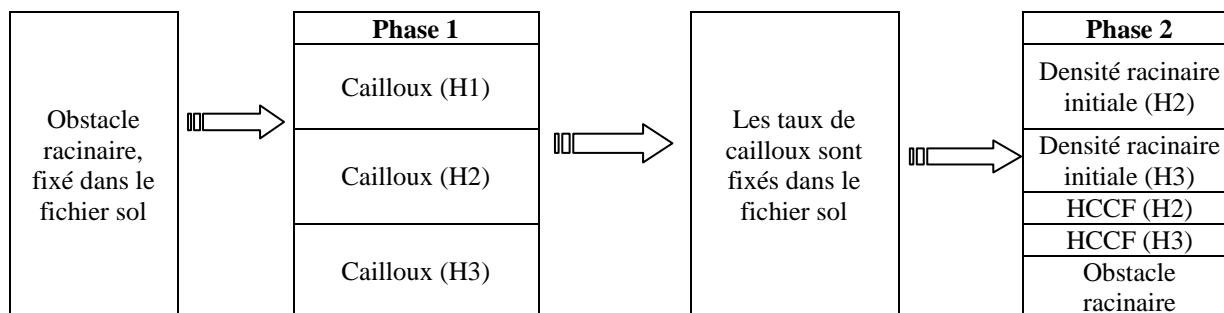
- *Analyse de sensibilité pour réduire le nombre de paramètres*

Sur la base de ce jeu de données, une analyse de sensibilité a été faite pour hiérarchiser les paramètres en fonction de leur poids dans la qualité du modèle, estimée par son erreur quadratique (RMSE) et son biais (MD). Pour cela, un seul paramètre à la fois a subi la variation, les autres étant fixés aux valeurs observées ou mesurées. La variation du paramètre a été réalisée de la même façon dans tous les horizons. Les équations qui décrivent l'erreur quadratique (RMSE) et le biais (MD) sont données dans le chapitre II (Équation 13 et Équation 16). Ainsi, la sensibilité d'un paramètre est jugée importante si sa variation engendre une erreur importante avec un biais faible (valeur de MD proche de 0).

Une classification des paramètres par rapport à ces deux variables statistiques sur notre jeu de données montre que le calcul du potentiel de base est très sensible à l'obstacle racinaire, à *HCCF* et à la densité des racines initiales (Tableau 4). D'autre part, vu l'importance de la quantité de cailloux dans les sols viticoles, il a été décidé de garder aussi la teneur en cailloux, bien qu'elle soit classée en dernière position. Nous avons décidé de ne pas optimiser *HMINF* (et donc de le fixer), car ses valeurs mesurées en laboratoire sont plus fiables que celles de *HCCF* mesurées en laboratoire. Pour le type de cailloux, les tests ont révélé une meilleure simulation avec le type de cailloux 10 (c'est-à-dire ceux qui n'absorbent pas d'eau : masse volumique et humidité à la capacité au champ égales à 0).

- *Optimisation sous contrainte en 2 phases*

La procédure d'optimisation de STICS permet d'optimiser de 1 à 5 paramètres (parmi ceux disponibles dans le fichier d'entrée) sur une variable observée (dans notre cas le potentiel foliaire de base). Le critère utilisé est celui des moindres carrés. Pour initialiser l'optimisation, une valeur doit être affectée à chaque paramètre sélectionné. Pour s'assurer de ne pas obtenir des valeurs correspondant à des « minimaux locaux », plusieurs valeurs initiales ont été testées. Par ailleurs, pour obtenir des valeurs biophysiquement pertinentes, une information *a priori* sur les paramètres du modèle a été introduite (optimisation sous contrainte-méthode Bayésienne) sous forme des bornes (Tableau 5).



Cette méthode prend en compte dans une première phase le taux de cailloux afin de le fixer. Dans la deuxième phase, on optimise les paramètres les plus influents : l'obstacle racinaire, les densités

Tableau 5. Valeurs des bornes données aux paramètres dans le cadre d'optimisations sous contrainte (méthode Bayésienne)

Variable	Borne inférieure	Borne supérieure
Cailloux (H1) Cailloux (H2) Cailloux (H3)	Quantité de cailloux de l'horizon – 10%	100 %
Hccf (H2)	Hccf (H2) – 5%	Hccf (H2) + 5%
Hccf (H3)	Hccf (H3) – 5%	Hccf (H3) + 5%
Obstarac	20	170
Densinitial (H2)	0	0.1
Densinitial (H3)	0	0.1

Tableau 6. Valeurs des paramètres du sol optimisés, pour les trois parcelles selon les différentes stratégies adoptées.

Paramètres	Mesures	Sauteyrargues				
		2004	2001+2002+2003	2001	2002	2003
Cailloux (H1)	50	22.07	73.21	59.81	70.7	61.7
Cailloux (H2)	45	53.37	75.28	55.92	74.1	66.7
Cailloux (H3)	85	78.88	96.59	62.69	96.2	94.7
Densinitial (H2)	0.0465	0.052	0.03	0.051	0.06	0.05
Densinitial (H3)	0.034	0.049	0.097	0.052	0.05	0.07
HCCF (H2)	22.5	24.32	20.13	19.65	21.2	20.1
HCCF (H3)	27.5	19.72	22.69	30.91	26.4	25.5
Obstarac	200	118.21	167.89	100.9	98.5	95.7
Critères		0.043	0.133	0.038	0.04	0.03

Paramètres	Bolchet		Serres Sec			
	Mesures	2004	Mesures	2002+2003	2002	2003
Cailloux (H1)	10	22.07	40	64.68	48.97	47.71
Cailloux (H2)	34	53.37	70	64.04	50.37	58.92
Cailloux (H3)	80	78.88	65	59.52	58.12	53.56
Densinitial (H2)	0.048	0.052	0.0222	0.063	0.056	0.058
Densinitial (H3)	0.01	0.049	0.069	0.059	0.057	0.052
HCCF (H2)	22.24	24.32	19.2	19.9	14.66	15.76
HCCF (H3)	20.2	19.72	15.8	14.57	12.68	12.66
Obstarac	120	118.21	200	141.15	136.25	133.23
Critères		0.043		0.141	0.144	0.076

racinaires initiales et HCCF. L'optimisation suit deux stratégies différentes : la première consiste en une optimisation de l'ensemble des années ; la seconde, possible dans les parcelles avec plusieurs années d'observation, consiste en une optimisation année par année, suivie d'une analyse de la stabilité du paramétrage.

4.3.3. Résultats et Discussion des limites du formalisme

Les résultats obtenus sont résumés dans le Tableau 6. La méthode d'optimisation en deux phases s'avère satisfaisante car elle permet d'obtenir des valeurs correctes des paramètres, ainsi qu'une description fiable de la dynamique du potentiel de base (Figure 5).

Cependant, dans ce cadre expérimental, il est apparu une dépendance des paramètres du sol calculés à l'année utilisée, ce qui paraît gênant pour des paramètres supposés permanents. L'estimation du LAI est présentée comme une possible source d'erreur pour le bon fonctionnement de la simulation du potentiel foliaire de base.

Par ailleurs, insistons sur le fait que le paramétrage nécessite l'avis des experts qui peuvent confronter les résultats obtenus avec la connaissance qu'ils ont de leurs parcelles et fournir l'information *a priori* sur les paramètres, indispensable pour éviter les compensations entraînant des valeurs aberrantes.

De Munter (2004) mentionne l'apparition d'un artefact dans un cas concret (parcelle de Bolchet en 2004) (Figure 6). Une brusque baisse du potentiel foliaire de base apparaît au jour 181 comme si la parcelle avait subi brutalement une contrainte hydrique. Par la suite le potentiel remonte brutalement. Ceci est dû à un artefact de la programmation du potentiel foliaire de base. En effet, dans le formalisme, les horizons dont le potentiel hydrique est inférieur à -1.5 MPa n'interviennent pas dans le calcul (cas du Bolchet). Ainsi, le modèle «abandonne» les racines de l'horizon 3 car il considère que le potentiel foliaire de base est trop bas. Cependant, dans la réalité l'adaptation de la plante se fait dans l'espace de temps infra journalier (Payan et Salançon, 2004), c'est-à-dire de manière progressive. Cela, le modèle ne peut pas le représenter. Ceci rappelle que l'objectif en introduisant le formalisme sur le calcul du potentiel hydrique de base est d'obtenir une idée correcte des caractéristiques du sol et non pas de simuler le fonctionnement de la plante.

Cette méthodologie sera appliquée dans l'optimisation des paramètres du chapitre III.

5. La Système de conduite de la vigne dans STICS

5.1. Spécificités de la vigne

Le système de conduite de la vigne est défini par plusieurs facteurs : la géométrie de plantation et la densité, le type de taille (Cordon royat, guyot double ou simple et gobelet), l'architecture de la végétation (palissage ou libre), et les opérations en vert dont fait partie la récolte (rognage, éclaircissage, effeuillage...). Tous ces éléments ont comme objectif principal de contrôler la forme de la plante, son microclimat et les équilibres physiologiques «source-puits» qui vont avoir un impact direct sur la qualité (Carbonneau, 2000).

Figure 5. Simulation des potentiels foliaires de base après optimisation des paramètres par année de Sauteyrargues.

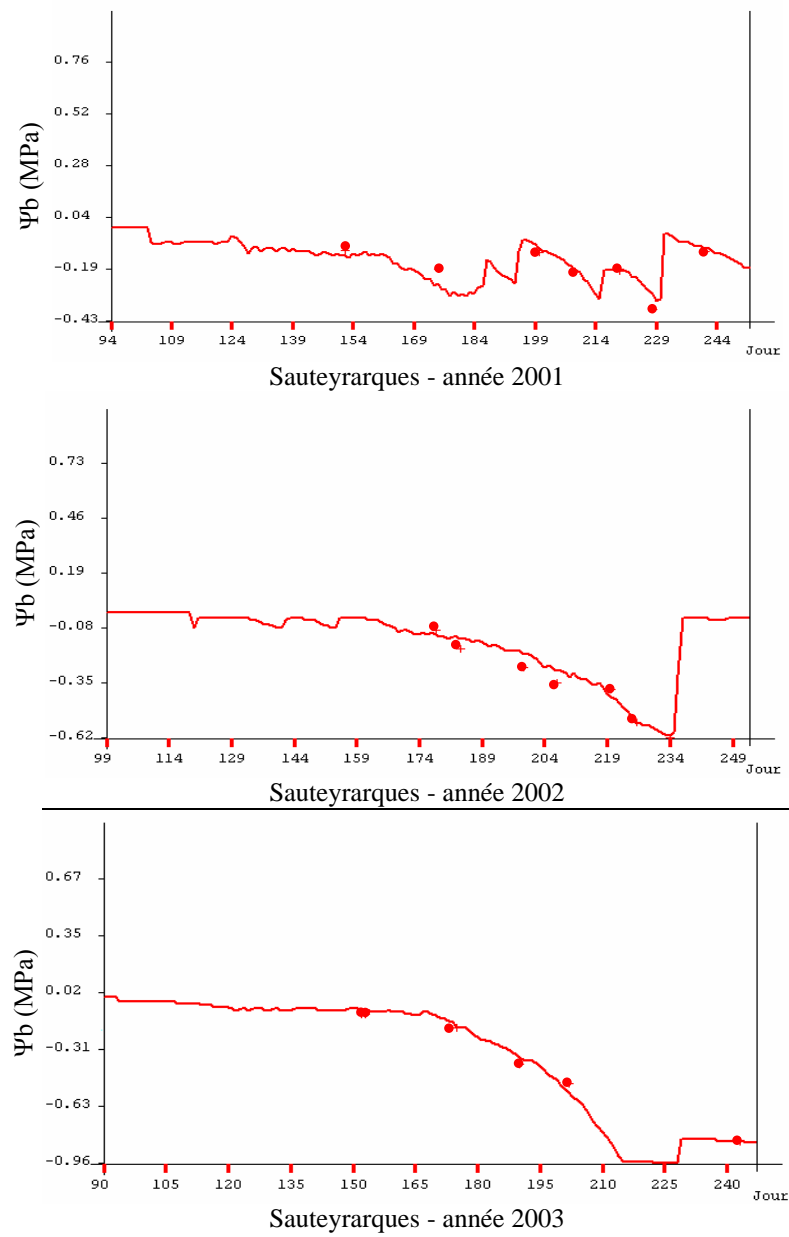
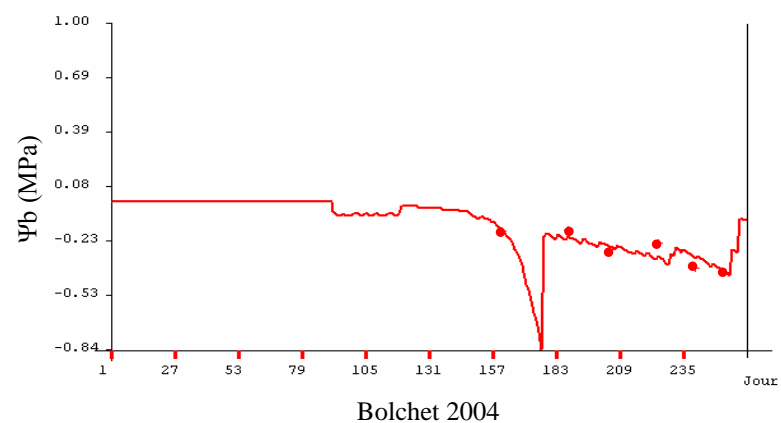


Figure 6. Simulation du Ψ_b , pour la parcelle du Bolchet (2004). On observe une descente très forte le jour 181.



La compréhension du système de conduite se révèle fondamentale dans le cadre de la modélisation. C'est une espèce conduite en rang pour laquelle l'architecture du feuillage a une importance primordiale sur l'interception du rayonnement solaire (Riou *et al.*, 1988), compte tenu des faibles LAI. La taille et le système de conduite ont un impact sur la quantité de rayonnement intercepté ainsi que sur la répartition de la lumière à l'intérieur du couvert. Le rapport hauteur de feuillage/écartement entre rangs est un critère qui permet de qualifier l'architecture du feuillage (Archer et Strauss, 1989 ; Carbonneau, 2000).

Le viticulteur gère le feuillage au cours de sa croissance par les pratiques de rognage, d'effeuillage, d'épamprage et d'ébourgeonnage. Ces pratiques d'entretien ont un impact d'une part sur l'amélioration de l'exposition de la vigne à la lumière par la structuration du feuillage, d'autre part pour la recherche d'un équilibre feuille/fruit, ce qui conduit à une augmentation de la qualité de la grappe (Dokoozlian et Kliewer, 1996).

L'impact de la densité de plantation sur le fonctionnement du système vigne est difficile à évaluer, à cause en particulier de la difficulté de mise en place d'expérimentations qui permettraient d'étudier cet effet. Dans le vignoble français la densité de plantation peut varier de 0.25 à 1 cep/m² (les densités les plus courantes), ce qui est une gamme très large (voir par exemple Tableau 1-Annexe 1). La diminution de la densité de plantation (distance sur le rang constante et variation de l'inter-rang), génère une faible augmentation du rendement par cep mais une forte réduction du rendement par m² (Champagnol, 1984 ; Archer et Strauss, 1989 ; Murisier et Zufferey, 2003 et 2004). De la même façon elle provoque une augmentation des réserves carbonées (Hunter, 2000). Champagnol (1984) et Carbonneau (2000) considèrent que l'effet des fortes densités est beaucoup plus intéressant au niveau racinaire pour exploiter les sols pauvres. Les effets ci-nommés sont pris en compte dans le modèle STICS par la fonction de densité (Brisson *et al.*, 1998a). Mais il existe d'autres effets non pris en compte. Ainsi, des nombreux auteurs montrent qu'à même densité, les effets des distances inter-rang et sur le rang ne sont pas équivalents (Bioletti et Winkler, 1934 ; Hidalgo et Candela, 1969 ; Casteran *et al.*, 1980 ; Murisier et Ferretti, 1996). De plus, le viticulteur gère la compétition entre ceps par la taille, qui détermine le nombre de bourgeons végétatifs (Murisier et Zufferey, 2003 et 2004). Enfin, des densités excessives, accompagnées d'une forte vigueur, peuvent générer une diminution du rendement à cause de problèmes sanitaires (Champagnol, 1984).

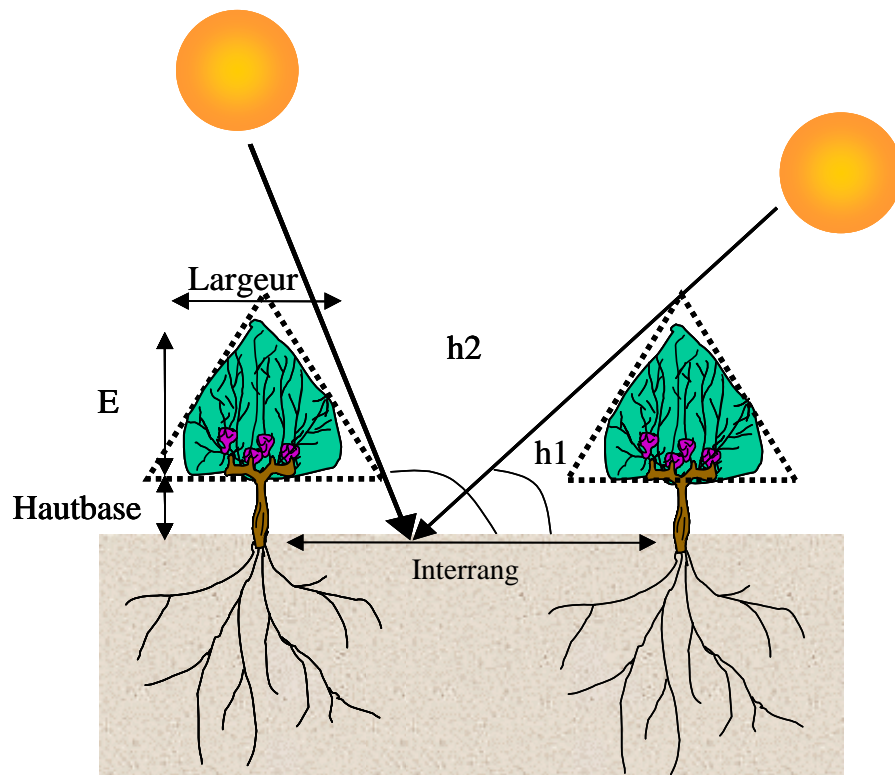
Le travail qui suit vise à éclaircir les capacités du modèle à prendre en compte l'ensemble de ces effets, nous permettant d'effectuer des choix raisonnés.

5.2. La structure de la plantation et ses effets dans STICS

5.2.1. La structure en rang et la forme de densité foliaire

La structure de végétation décrite dans le modèle correspond aux cultures en rang. Par conséquent, dans le cas de la vigne, le modèle ne peut être utilisé que pour des conduites en palissage. Les conduites avec une architecture libre (type gobelet) ou ouverte (lyre) ne peuvent pas être prises en compte, sans modification du formalisme qui permet de simuler l'interception du rayonnement, mais le modèle est utilisable dans la plupart de vignobles : conduite en guyot simple, double, cordon, chablis...

Figure 7. Représentation simplifiée du couvert végétal et des principes de calcul du rayonnement journalier sur l'inter-rang (adapté de Brisson et al. 2004).



Ils existent plusieurs travaux sur la modélisation de l'interception du rayonnement par la vigne (Smart, 1973 ; Riou *et al.*, 1988 ; Sinoquet et Bohomme, 1992 ; Mabrouk *et al.*, 1997a et b), dont certains utilisent une description architectural du feuillage (Louarn, 2005 ; Lebon *et al.*, 2005). La solution utilisée dans le modèle (Brisson *et al.*, 2004) est adaptée au pas de temps journalier. Le rayonnement reçu en un point X de l'inter-rang est déduit des angles critiques sous lesquels le point X reçoit directement le rayonnement global (Figure 7). En dessous de ces angles, le point X reçoit un rayonnement plus faible que le rayonnement global du fait de l'absorption par la culture. Le rayonnement en X est donc défini comme la somme du rayonnement non intercepté par les plantes (soleil entre les angles critiques) et du rayonnement transmis à travers les plantes. Chacun des rayonnements comprend une composante directe et une composante diffuse. Le modèle fait l'hypothèse que pour la partie transmise, le même coefficient d'extinction du PAR (paramètre *KTROU*) est appliqué au rayonnement direct et au rayonnement diffus.

La distribution du feuillage est considérée selon trois formes simples (*FORME*) supposées infinies sur le rang : un rectangle (■), un triangle pointant vers le haut (▲) ou vers le bas (▼). Ces trois formes vont définir la distribution de la densité de feuillage (et non la description géométrique). Par exemple, pour la forme rectangle, on considère une distribution homogène de la densité du feuillage, alors que pour le triangle (▲), cette densité est plus importante à la base. Le rapport entre la hauteur et la largeur du feuillage, selon la forme de distribution choisie, est supposé constant, c'est le paramètre *RAPFORME*.

Pour introduire la densification observée du feuillage, une relation croissante entre la densité foliaire (*DFOL*) et le LAI a été introduite, admettant deux seuils de densité foliaire : *DFOLBAS* et *DFOLHAUT*.

Une étude de l'impact de la forme de la distribution de densité foliaire a été réalisée (Perotto, 2005). Elle a montré des variations faibles sur la production (moins de 10%). Pour respecter des densités foliaires paraissant plus importantes à la base qu'au sommet du feuillage, nous avons préféré la forme triangle (▲) qui semble la plus pertinente et la plus réaliste sur tout le cycle et sur les types de conduites utilisés le plus couramment (Schultz, 1995). Un travail identique a été réalisé avec le rapport entre la hauteur et la largeur du feuillage (paramètre *RAPFORME*) (variation de la valeur entre 0.2-1.5), qui s'est avéré n'avoir aucun impact sur la production finale, dans des configurations de larges inter-rangs typiques du vignoble des Côtes du Rhône. Cette conclusion ne serait sans doute pas extrapolable à des inter-rangs plus faibles. Toutefois, les opérations de palissage et de rognage limitent énormément le poids de ce paramètre dans le cas de la vigne. Nous avons retenue une valeur correspondant au gabarit de vignes en début de cycle (*RAPFORME* égal à 1.5).

5.2.2. Le palissage

Pour tenir compte du palissage et de la nature de liane de la vigne, nous avons introduit des limites de forme techniques qui remplacent les limites supposées génétiques. Pour cela, deux nouveaux paramètres (*LARGTEC* et *HAUTMAXTEC*) sont définis comme la largeur et la hauteur techniques maximales, respectivement. Ces paramètres remplacent le paramètre de forme génétique *HAUTEURMAX*.

5.2.3. La densité de plantation

Le calcul de l'expansion foliaire (*DELTAI*) a quatre composantes (Équation 5) dont l'une dépend de la densité et permet de prendre en compte le possible effet de la compétition entre ceps à l'échelle du

peuplement à partir d'un certain niveau de LAI (*LAICOMP*). Le même effet joue sur la croissance racinaire (Équation 6).

Équation 5

$$DELTAI = DELTAI_{developpment} \cdot DELTAI_{Température} \cdot DELTAI_{densité} \cdot DELTAI_{stress}$$

Équation 6

$$\text{si } LAI > LAICOMP \quad DELTAI_{densité} = DENSITE \cdot \left(\frac{DENSITE}{BDENS} \right)^{ADENS}$$

$$\text{si } LAI \leq LAICOMP \quad DELTAI_{densité} = DENSITE$$

où *BDENS* est défini comme la densité (plante/m²) au dessous de laquelle il n'y a pas d'effet ; et *ADENS* représente la capacité de la plante à supporter des densités croissantes. Ce formalisme a été introduit initialement pour les plantes annuelles, sur lesquelles on observe de fortes densités de semis (par exemple, 9 plantes/m² pour le maïs ou 250 grains/m² pour le blé). Compte tenu des faibles densités rencontrées en viticulture (rarement des densités supérieures à 1 cep/m²), et de l'absence de données permettant d'ajuster le paramètre *ADENS*, nous l'avons considéré comme nul, ce qui revient à faire l'hypothèse que, dans les gammes de densités pratiquées, les ceps fonctionnent indépendamment les uns des autres.

5.3. Les techniques de contrôle du feuillage et du rendement en cours de végétation dans STICS

Le modèle STICS prend en compte un certain nombre des techniques de contrôle du rendement végétative et du LAI : le rognage, l'effeuillage, l'éclaircissage (Brisson *et al.*, 2002b). Cependant, suite aux expérimentations menées dans le cadre de la thèse, quelques commentaires sont nécessaires, pour bien comprendre l'impact de ces techniques à l'intérieur du modèle

5.3.1. Contrôle du feuillage

Dans le modèle, la gestion du rognage se fait en fonction de la forme géométrique (on impose hauteur et largeur de rognage) et l'effeuillage se fait en fonction du LAI (on supprime une portion du LAI). Cependant, dans la réalité, ces deux techniques sont gérées en fonction de la forme géométrique du feuillage (en fonction du réglage de la machine en largeur et hauteur) et de la vigueur de la parcelle. Par conséquent l'option d'effeuillage n'a pas été utilisée. Le modèle peut par ailleurs calculer les besoins en rognage en fonction d'une tolérance en biomasse en dessus du gabarit requis mais ce genre d'automatisme n'est pas conforme à la réalité technique des viticulteurs. Finalement, il serait important dans le futur d'introduire plusieurs dates et gabarits de rognages.

5.3.2. Contrôle du nombre de grappes

La principale composante du rendement est le nombre des grappes par cep. Elle est directement liée à la taille dédiée à la gestion de la "charge en grappes" du cep. Or, le modèle ne gère pas la relation entre la taille et le nombre de grappes présentes sur un cep. Nous sommes donc obligés de renseigner le type de taille par le biais d'un nombre maximal de grappes (*INFLOMAX*). Ce paramètre se trouve dans le

fichier plante, au lieu du fichier technique, car il est considéré comme une caractéristique génétique. Ce nombre maximal de grappes pourra être réduit en cas d'éclaircissage. L'éclaircissage est intégré dans le modèle par la définition d'une date (*JULECLAIR*) et le nombre de grappes à supprimer (*NBFROTE*) sur le nombre de grappes défini initialement (*INFLOMAX*).

Au delà de la non-prise en compte de la taille, ce formalisme présente quelques limites. D'une part le nombre d'inflorescences de l'année n est défini autour de la floraison de l'année $n-1$ (Baldwin, 1964). Pour pouvoir intégrer cet élément dans le modèle, il faudrait prendre en compte les conditions climatiques de l'année précédant la simulation du cycle végétatif (Walker *et al.*, 2005). Cependant, une observation approfondie des conditions de l'induction florale est nécessaire pour chaque cépage. D'autre part, cela permettrait de définir la fertilité des bourgeons (en terme de grappes par bourgeon) qui va dépendre aussi du cépage (Huglin et Schneider, 1998). Par ailleurs, le nombre de grappes à éclaircir est estimé par le viticulteur en fonction de l'état trophique de la plante, ce qui peut amener à de fortes variations d'une année sur l'autre et n'est pas pris en compte par le modèle.

6. Gestion des réserves chez la vigne.

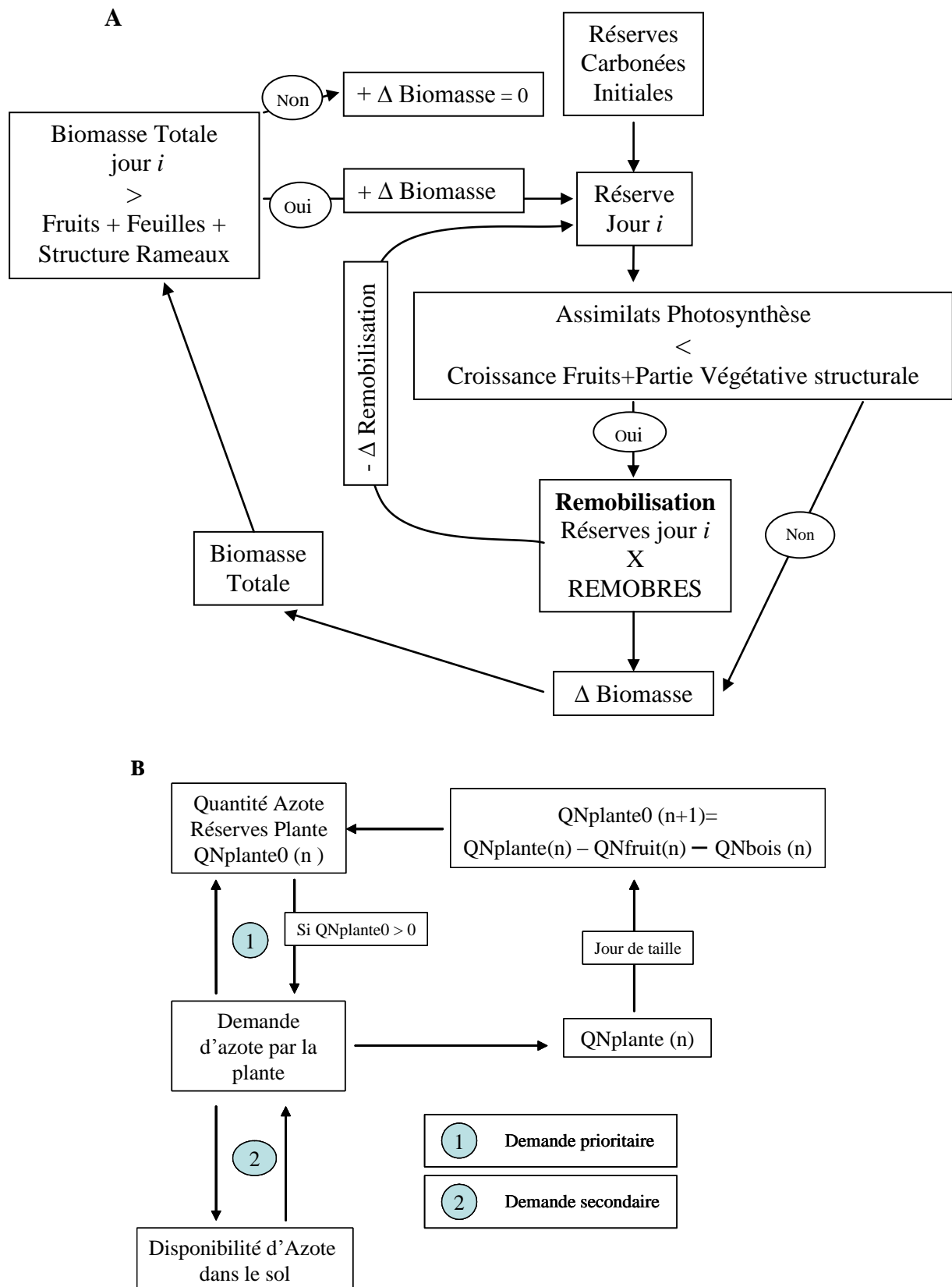
6.1. Base physiologique des réserves chez la vigne

Les réserves, stockées au cours de la saison précédente dans des structures pérennes telles que le tronc et le système racinaire permanent, sont utilisées pour initier la croissance au début de chaque saison. Ces réserves sont de nature biochimique variée : glucose et amidon (Williams, 1996), acides aminés, (Keller *et al.*, 1995) et minéraux (Williams, 1991). Ces réserves permettent à la plante de maintenir la respiration et la biosynthèse pendant les mois d'hiver, lorsque les ceps ne possèdent pas d'appareil photosynthétique. La quantité de réserves dans la plante est limitée et va varier en fonction du cépage, de la taille des plants, de l'âge, du rendement, des conditions de milieu et du type de conduite (Castelan-Estrada, 2001). Dans la plante, les racines constituent le principal organe de stockage : elles regroupent 80% de l'amidon et environ 75% de l'azote au début de la saison (Bates *et al.*, 2002). Dans le modèle, nous allons nous intéresser aux réserves azotées et carbonées.

6.1.1. Les réserves carbonées.

La principale forme de mise en réserves des glucides est l'amidon (Zapata, 1998 ; Zapata *et al.*, 2004). Les réserves glucidiques présentent des variations saisonnières en fonction du stockage ou de leur utilisation par la plante (Williams, 1996). Elle sont utilisées au début de la croissance car la capacité photosynthétique de la plante ne suffit pas à remplir les besoins de la plante (Zapata, 1998 ; Zapata *et al.*, 2004) et ensuite sont reconstituées pendant la saison. Néanmoins, ces réserves peuvent être mobilisées tout le long de la croissance de la plante, si le carbone fixé par la photosynthèse devient insuffisant aux besoins instantanés de la plante (Champagnol, 1984). Les teneurs en sucres mesurées dans le bois d'un an et plus peuvent atteindre 25% de la biomasse sèche structurale (Winkler et Williams, 1945). La reconstitution des réserves dans la plante a lieu principalement en fin du cycle végétatif, pendant la phase de maturation et surtout après la récolte (Champagnol, 1984). Murisier (1996) montre qu'il existe une relation inverse entre la charge en fruits et le niveau des réserves

Figure 8. Schéma qui décrit la prise en compte et de l'utilisation des réserves carbonées (A) et azotées (B), pour la vigne dans le modèle STICS.



glucidiques. Des charges trop importantes (forts déséquilibres feuille/fruit) entraînent une forte diminution des réserves glucidiques (qui peut augmenter la sensibilité de la plante aux maladies physiologiques, exemple de la chlorose ferrique) (Murisier, 1996), ainsi que du potentiel d'activité photosynthétique de l'année suivante (Duchene *et al.*, 2003).

6.1.2. Les réserves azotées.

Les réserves azotées jouent un rôle essentiel pour la reprise de la végétation, car la vigne n'assimile pas beaucoup d'azote au début du cycle, quelle que soit la disponibilité d'azote dans le sol (Nassar et Kliewer, 1966 ; Conradie, 1980 et 1986 ; Wermelinger *et al.*, 1991 ; Zapata, 1998 ; Zapata *et al.*, 2004). Le niveau des réserves azotées suit celui des réserves carbonées et atteint un minimum pendant la période de floraison (Keller *et al.*, 1995). L'assimilation de l'azote par la vigne n'est pas régulière pendant le cycle végétatif : elle présente une forte remobilisation de l'azote des réserves jusqu'à la floraison, suivie d'une assimilation importante de l'azote du sol jusqu'à la véraison et une reprise de cette assimilation après la récolte (les besoins sont remplis après la nouaison) (Zapata, 1998). L'azote des parties pérennes est issu d'une reprise de l'assimilation en fin d'année et aussi de la remobilisation de l'azote des feuilles sénescentes (Wermelinger *et al.*, 1991 ; Zapata, 1998 ; Zapata *et al.*, 2004).

6.2. Description du formalisme introduit dans STICS

6.2.1. Gestion de réserves carbonées

Pour décrire le fonctionnement des réserves dans les modèles de culture, il est couramment accepté que si la photosynthèse excède la demande, l'excès de carbone est attribué aux réserves glucidiques (Wermelinger *et al.*, 1991 ; Brisson *et al.*, 2003). Dans le cas du modèle STICS, les réserves représentent un compartiment non localisé (cela peut être dans les tiges, les racines, voire les feuilles).

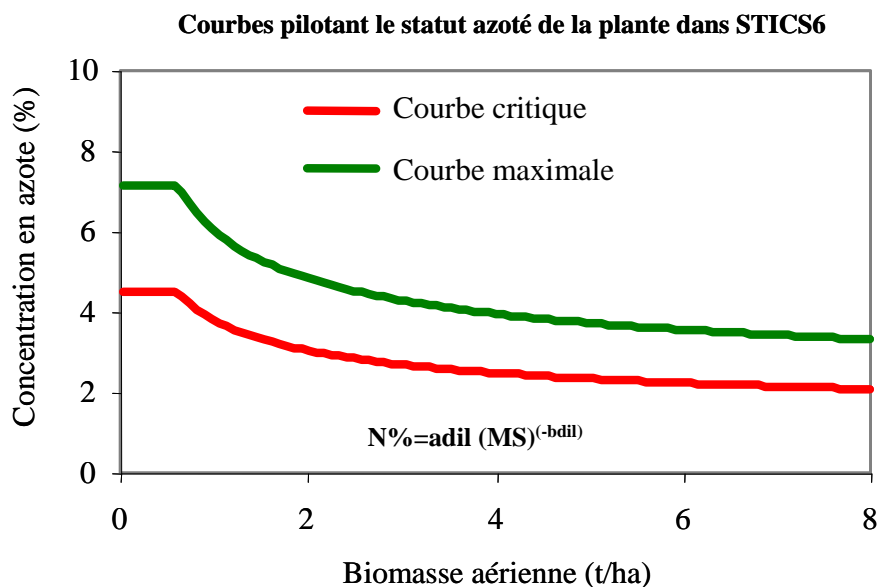
Dans le cas des réserves carbonées (variable *RESPERENNE* dans le modèle), elles sont initialisées au début du cycle à une valeur non-nulle (paramètre *RESPERENNEO*), afin de permettre de représenter le rôle joué par les réserves racinaires dans la reprise de la végétation. La gestion des réserves carbonées comprend leur stockage et leur remobilisation. Le stockage est déterminé d'un côté par la quantité issue de la différence entre la biomasse totale produite par la plante, et d'un autre côté par le cumul de la biomasse des fruits, des feuilles vertes, des feuilles sénescentes et de la partie structurale des rameaux (variable *MARESERVE*). Il est calculé tous les jours et permet de remplir les réserves. Ce "réservoir" a été limité pour ne pas laisser le modèle dépasser une quantité maximale de stockage dans la plante (limite de la source par les puits). En effet, comme nous l'avons vu précédemment, la quantité de réserves stockées est limitée par la taille hivernale, laquelle limite l'expansion et la taille du tronc et donc le volume disponible pour la plante (Delpuech, 2003). La remobilisation dépend du bilan entre les assimilats produits par la photosynthèse et la croissance des parties végétatives et des fruits. Ainsi, si la demande en croissance de la plante dépasse la production photosynthétique, le modèle remobilise des réserves. Cette remobilisation (*DLTAREMOBIL*) est estimée en fonction de la demande en croissance et limitée par la disponibilité présente dans la plante ($RESPERENNE \times REMOBRES$), *REMOBRES* étant un paramètre qui définit la proportion de réserve remobilisable chaque jour.

Tableau 7. Teneurs en azote des différentes parties de la plante à différents stades.

	Feuilles (% MS)		Rameaux (% MS)		Grappes (% MS)		Partie pérennes et racines (% MS)	
	Avant floraison	Après floraison	Avant floraison	Après floraison	Avant floraison	Après floraison	Avant floraison	Après floraison
Champagnol (1984)	3 - 4	1.5 - 2.5	-	-	-	-	-	-
Gutierrez et al. (1991)	4 - 6	± 2.5	1 - 5	< 1	3 - 6	1 - ± 2.5		
Conradie (1980)		1.8 - 2.6						
Zapata (2004)	± 4 ***	± 2 ***					± 1.6* ± 0.8**	± 1.2* ± 0.4**
Autres Expérimentations Vigne	1.9 - 5.1	1 - 2.8 2.1-3.3 ⁺	0.4 - 3	0.2 - 1.2 0.5-0.9 ⁺	1 - 5	1.3 - 0.3		

Teneur en azote des racines. ** Teneur en azote du tronc. *** Teneur en azote des parties aériennes (Rameaux+Feuilles). + Teneur en azote des rameaux et feuilles secondaires.

Figure 9. Relations entre la teneur azotée de la plante et sa biomasse : la courbe « haute » définit le niveau maximal et la courbe « basse » le niveau critique en dessous duquel la plante souffre de carence azotée et réduit sa croissance.



6.2.2. Gestion des réserves azotées

Dans le modèle, RESPERENNE (et RESPERENNEO) ne représente que les réserves carbonées et c'est par le biais du paramètre *QNPLANTEO* que l'on peut y adjoindre des réserves azotées. Le fonctionnement des réserves azotées agit de manière concomitante avec les réserves carbonées de la plante. Sa gestion dans le modèle est contrôlée dans le module "Croissance aérienne" et par le module "Bilan Azotée". Comme dans le cas des réserves carbonées, les réserves azotées sont aussi initialisées au début du cycle (par le paramètre *QNPLANTEO*). La remobilisation de ces réserves est réalisée en fonction de la demande en azote par la plante. Conformément aux résultats de la littérature, nous avons considéré que la plante remplit ses besoins en azote d'abord avec ses réserves azotées et ensuite par absorption de l'azote du sol. Cela nous permet d'être très proche du fonctionnement dans la réalité. La quantité d'azoté remobilisable est aussi limitée par la quantité présente initialement dans la plante. Contrairement aux réserves carbonées, les réserves azotées ne sont pas stockées dynamiquement pendant le cycle de la plante, mais à la fin du cycle, au moment de la taille. La quantité mise en réserve est déterminée par la différence entre la quantité totale d'azoté cumulé dans la plante pendant le cycle, moins l'azote qui est prélevé au moment de la taille (azote dans les rameaux du bois de taille) et l'azote qui était présent dans les fruits. Il faut remarquer que la remobilisation des réserves carbonées n'induit pas d'augmentation de la demande azotée, qui n'est calculée que sur la base des assimilats néoformés uniquement. Le schéma de la Figure 8 résume les explications données ci-dessus.

7. L'azote

7.1. L'azote dans la vigne.

La teneur en azote est différente dans les divers organes de la plante et elle évolue avec le vieillissement (Champagnol, 1984 ; Wermenlinger et Koblet, 1990 ; Wermenlinger *et al.*, 1991 ; Zapata, 1998 ; Bates *et al.*, 2002) (Tableau 7). Cette évolution est décrite par une diminution qui peut être plus ou moins rapide en fonction de la teneur initiale (plus la teneur en azote printanière en azote est élevée, plus cette teneur diminue rapidement) (Champagnol, 1984). Les quantités d'azote prélevées par la vigne sont très faibles au début du cycle végétatif (avant le débourrement jusqu'à la floraison), étant donné que les besoins de la plante sont surtout assurés par les réserves azotées (cf. paragraphe précédent). Ces besoins augmentent à partir de la floraison. Les quantités prélevées dans l'ensemble du cycle varient entre 20 à 70 kg N ha⁻¹ an⁻¹, selon les auteurs (Delas, 1989 ; Champagnol, 1984 ; Marocke *et al.*, 1976 ; Zapata, 1998). Une partie de l'azote absorbé est restitué au sol au cours de l'automne au moment de la chute des feuilles et de la taille de la vigne (broyage de sarments sur place) (Rodriguez-Lovelle *et al.*, 2003 ; Thiebeau *et al.*, 2005). Les apports d'azote sont loin d'être généralisés en viticulture, contrairement à d'autres cultures. En effet, la fertilisation azotée est plutôt gérée avec l'objectif de limiter les effets négatifs des excès d'azote : retard de l'arrêt de croissance et prolongation de l'état juvénile, augmentation de la sensibilité au botrytis et à la coulure (Rodriguez-Lovelle *et al.*, 2003).

7.2. Le besoin d'azote de la vigne dans STICS

Si les mécanismes définissant l'offre en azote au niveau du système sol-racine n'ont pas lieu d'être modifiés par rapport aux cultures annuelles (minéralisation, absorption racinaire, recyclage des feuilles sénescentes...), la demande et le calcul de stress ont été reconsidérés pour tenir compte d'une part de la structure du peuplement et d'autre part des possibles variations rapides du stress azoté.

7.2.1. Remise en cause des courbes de dilution

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un programme de l'appel d'offre "Biosphère Continentale" (Lemaire et Brisson, 2005 ; Brisson *et al.*, 2006).

Dans le modèle STICS, la concentration en azote de la plante est calculée par des courbes de dilution, typiquement appliquées aux cultures herbacées en couvert dense (Figure 9) : la courbe dite critique correspond aux besoins métaboliques, alors que la courbe maximale intègre en plus les capacités de stockage sous formes diverses (protéines, acides aminés...). Dans la première version de STICS, la phase « plante isolée » était considérée comme une phase à teneur constante en azote critique et maximal. Dans la pratique, seul le paramétrage de la courbe critique est accessible à l'expérimentation (Justes *et al.*, 1994 ; Lemaire *et al.*, 1997), le niveau maximal étant difficile à atteindre. Ces bases peuvent poser des problèmes pour la vigne, plante cultivée en azote limitant (courbe maximale impossible à atteindre) et en rang (phase de plante isolée très longue) avec une capacité de stockage/déstockage dans ses parties pérennes. Les auteurs proposent de redéfinir la phase plante isolée pour mieux s'adapter à des plantes conduites en rang (cas de la vigne) et d'utiliser des données expérimentales pour bien définir les paramètres des courbes. Pour cela, deux courbes sont définies pour décrire la fonction de réponse « critique » : une courbe pour les faibles biomasses (phase « plante isolée » - NI) ; et une courbe pour les biomasses élevées (phase « peuplement dense » - NP). La même approche est utilisée pour la fonction de réponse maximale qui décrit les besoins (NIMAX et NPMAX). L'ensemble de ces courbes (Équation 7 et Équation 8) est représenté sur la Figure 20 (cf. § II.4.12.).

Équation 7

❖ Courbe « peuplement dense » $NP = ADIL \cdot MASEC^{-BDIL}$

❖ Courbe « plante isolée » $NI = ADILI \cdot MASEC^{-BDILI}$

Où *ADIL* et *BDIL* sont définis à partir des mesures issues des expérimentations. *ADILI* et *BDILI* sont calculés à partir des trois hypothèses suivantes (Brisson *et al.*, 2006) :

- ❖ il existe une valeur de concentration en azote métabolique (*NMETA*) qui correspond à la teneur en azote de la plantule qui ne comporte que des organes fonctionnels. Cette valeur est fonction du métabolisme des espèces ;
- ❖ une valeur arbitraire de biomasse est définie pour cet état de plantule (*MASECMETA*) et égal à 0.04 t/ha quelle que soit l'espèce ;
- ❖ la valeur de biomasse à l'intersection des 2 courbes « peuplement » et « plante isolée » (*MASECDIL*) est obtenue à partir des données expérimentales.

Parallèlement, les courbes maximales sont définies pour les deux phases :

Équation 8

❖ Courbe « peuplement dense » $NP_{MAX} = ADIL_{MAX} \cdot MASEC^{-BDIL_{MAX}}$

❖ Courbe « plante isolée » $NI_{MAX} = ADIL_{MAX} \cdot MASEC^{-BDIL_{MAX}}$

Pour les paramétrer, un autre paramètre est introduit (*NRES*) qui est défini comme la teneur en azote de réserve au point d'intersection des deux phases (défini par le paramètre *MASECDIL*). Plusieurs hypothèses sont nécessaires pour calculer les paramètres :

- ❖ au point d'intersection $NP_{MAX} = NI_{MAX} = NI + NRES$;
- ❖ pour la partie « peuplement » de la courbe maximale le paramètre *BDIL_{MAX}* est égal à *BDIL*;
- ❖ pour la phase « plante isolée », l'azote de la plantule n'est constitué que d'azote métabolique et il n'y a pas de « réserves initiales ».

A partir de ces hypothèses, on peut calculer analytiquement les paramètres *ADILI*, *BDILI*, *ADIL_{MAX}*, *BDIL_{MAX}* (*BDIL*) et *ADIL_{MAXI}* et *BDIL_{MAXI}*, de sorte que les paramètres à prescrire par espèce sont : *ADIL*, *BDIL*, *MASECDIL*, *NMETA* et *NRES*. La valeur de ces paramètres sera présentée dans le Chapitre III.

7.2.2. Introduction d'un indice de nutrition instantané

De récents travaux sur l'effet du stress azoté sur la plante (Mary et Guerif 2005) ont proposé d'utiliser un nouvel indice de nutrition instantané (Devienne-Baret et Mary, 2006). Cet indice est moins dépendant de l'état azoté de la plante et permet de mieux décrire des variations rapides de nutrition azotée que l'INN classique (Justes *et al.*, 1994 ; Lemaire et Meynard, 1997). Pour calculer cet indice, un nouveau paramètre est proposé *INNIMIN* qui définit l'intervalle de variation de l'INN instantané. Par construction, si *INNIMIN* = 0, cet intervalle correspond à l'intervalle de variation de l'INN classique, c'est-à-dire [*INNMIN*, 1] (sachant que *INNMIN* est égale le plus souvent à 0.3). Si *INNIMIN* est négatif son intervalle de variation est plus important.

8. La sénescence des feuilles

8.1. Rôle et déterminisme de la durée des feuilles de vigne

Le cycle végétatif de la vigne commence avec le débourrement et se termine par la chute des feuilles (stades 43 – 47 de l'échelle de Eichhorn et Lorenz, 1977). La chute des feuilles peut être influencée par leur âge, le statut hydrique et azoté de la plante, le gel, le vent, une carence minérale, ou des attaques parasitaires. Le jaunissement des feuilles qui précède généralement leur chute va déterminer le moment d'arrêt complet de leur activité photosynthétique, sachant qu'il y a une diminution progressive de cette activité avec le vieillissement des feuilles (Champagnol, 1984). Même après la récolte, la production photosynthétique peut rester importante : par exemple dans la région de Montpellier, elle peut atteindre plus de 40% de la production photosynthétique pendant la période véraison - récolte (Champagnol, 1984). Cette période est très importante pour la vigne, car c'est à ce

moment qu'elle va refaire ou compléter la plus grande partie de ses réserves, qui seront stockées dans le tronc et dans les racines. Dans le cadre des études d'impact du changement climatique, la bonne simulation de la sénescence des feuilles devient un élément important, car la prévision d'hivers plus tempérés peut augmenter le stockage des réserves par accroissement de la durée de vie des feuilles. Au contraire, l'augmentation prévue des sécheresses (exemples de 2003, 2005 et 2006) peut induire des stress hydriques et trophiques, mettant en danger la mise en réserve.

Sous nos latitudes, la durée de vie des feuilles de vigne semble d'avantage être sur l'influence de l'environnement que d'un déterminisme génétique. Ainsi, en faisant abstraction des différentes contraintes hydriques et minérales, les pertes de feuilles au cours du cycle sont très faibles. Le feuillage jaunit d'une manière globale à l'entrée de l'automne. Cependant, il existe bien une diminution de l'activité photosynthétique avec l'âge (Champagnol, 1984 ; Poni *et al.*, 1994 ; Schultz, 1995 ; Kozłowski et Pallardy, 1996 ; Escalona *et al.*, 2003 ; Sanchez de Miguel *et al.*, 2004), mais sous nos latitudes cette activité est encore significative pendant l'automne et donc on ne peut pas considérer que les feuilles soient sénescentes. D'une manière générale, les feuilles de vigne jaunissent au moment de la journée où les températures sont les plus fraîches (sans parler du gel, pour lequel la sénescence du feuillage peut être instantanée) et lorsque la durée du jour se raccourcit. Parallèlement, une consultation des différents experts des différentes régions viticoles françaises a montré qu'il n'existe pas une différence claire entre régions.

En complément, des observations faites sur des vignes avec des cépages "européens" dans des conditions tropicales, ont montré que les feuilles restaient vertes au delà de 2300°C.j (Xavier Delpuech, *commun .pers.*), contre les 1700-1800°C.j que nous pouvons observer de façon générale dans une région chaude comme la Vallée du Rhône.

Cet ensemble d'éléments permet de formuler l'hypothèse selon laquelle les feuilles de vigne ont une durée de vie génétique plus longue que celle observée sous nos latitudes et que leur sénescence est influencée par une combinaison des stress (eau, gel, azote,...) et le raccourcissement de la durée du jour (stress photopériodique). Cela explique les différences de sénescence entre vignobles situés à des latitudes différentes. Toutefois, il a été remarqué que les vignes très "vigoureuses" gardent plus longtemps leur feuillage que les vignes à faible "vigueur".

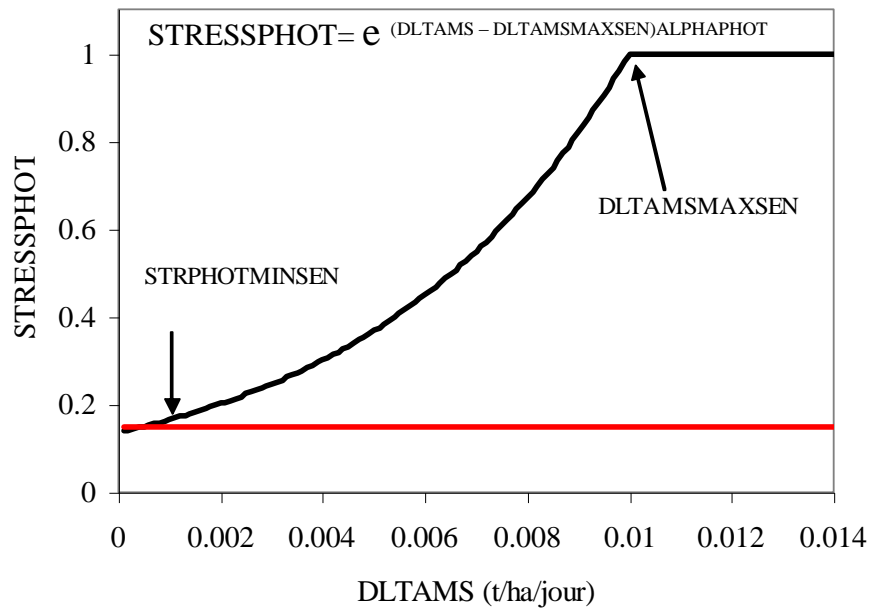
En ce qui concerne le photopériodisme, des travaux anciens (Alleweldt 1957, 1959, 1963a et b, 1964) montrent que la vigne est une plante de jours longs : les jours courts de 10 à 13 heures provoquent un arrêt de la croissance surtout sur les genres américains (*Vitis rupestris* et *Vitis riparia*), *Vitis vinifera* étant le genre le moins sensible. Le raccourcissement de la durée du jour a un impact connu sur la production d'acide abscissique, qui va accélérer le vieillissement et la chute des feuilles (Alleweldt et During, 1972 ; Champagnol, 1984).

En conclusion, il est essentiel que le modèle STICS décrive soigneusement cette phase ultime du développement foliaire de la vigne. Cependant, l'absence de données d'observation rend ce point difficile à appréhender.

8.2. Introduction de la photopériode et de la vigueur dans le calcul de la durée de vie

Le calcul de la sénescence dans STICS s'appuie sur la notion de durée de vie des feuilles, modulée selon l'âge de la plante, les stress hydrique et azoté et la sur-fertilisation azotée. Compte tenu du mode

Figure 10. Courbe qui définit la relation entre le coefficient STRESSPHOT et la valeur de DLTAMS. *DLTAMSMAXSEN* est le paramètre de vigueur qui annule l'effet de la photopériode et permet de retarder la sénescence ; *ALPHAPHOT* est le paramètre qui va définir la rayon de courbure de l'exponentielle ; et *STRPHOTMINSEN* est un seuil minimal à partir duquel on considère que l'activité photosynthétique de la plante n'a plus d'effet sur le retard de sénescence.



de conduite de la vigne, cet effet de sur-fertilisation sera négligé par la suite. Le calcul de la durée de vie inclut donc à la fois la sénescence naturelle (via la durée de vie potentielle en fonction de l'âge de la plante), et la sénescence accélérée via les stress. Le LAI sénéscent au jour n de la simulation, correspond au LAI produit le jour m et dont la durée de vie est « $n - m$ » (Brisson *et al.*, 2003). Traduisant cela en équation (Équation 9) :

Équation 9

$$DURVIEF(n) = \underset{m}{MIN}^n [DURAGE \times \min(SENSTRESS, FSRESSGEL)]$$

où $DURAGE$ est la durée de vie potentielle en fonction de l'âge de la plante, $SENSTRESS$ est une fonction de l'état hydrique et azoté de la plante, $FSRESSGEL$ est une fonction du stress généré par le gel sur les feuilles. La fonction MIN indique qu'au cours de la vie de la feuille, la durée de vie est amenée à fluctuer, c'est toujours la durée la plus courte qui est active, supposant ainsi la non-réversibilité du phénomène. Cette durée n'est pas exprimée en degrés.jours ($^{\circ}C.j-1$) comme le développement car dès que la température est inférieure à la température de base ($TDMIN$) cette évolution serait stoppée. Pour y remédier, le parcours journalier de sénescence est exprimé par un Q10 de 2, soit : $2^{\frac{T-TDMIN}{10}}$ au lieu de $T-TDMIN$. Dans ce cas, la durée de vie de la feuille ($DURVIEF$) exprimée en Q10 représente environ 1/5 de la même durée de vie exprimée en degrés.jours ($^{\circ}C.j-1$).

Pour améliorer le calcul de la durée de vie des feuilles pour la vigne, nous proposons d'introduire un effet négatif de la photopériode ($STRESSPHOT$:Équation 10) en deçà d'un certain seuil, selon une forme exponentielle (Figure 10). Parallèlement, pour introduire l'impact de la vigueur sur le prolongement possible de la durée de vie, même en deçà du seuil photopériodique, nous utiliserons la variable de photosynthèse journalière ($DLTAMS$) qui résume le rôle du climat et des stress (Équation 11).

Équation 10

$$DURVIEF(n) = \underset{m}{MIN}^n [DURAGE \times \min(SENSTRESS, FSRESSGEL) \times STRESSPHOT]$$

Équation 11

Si $PHOBASE \geq PHOI$ ou $DLTAMS \geq DLTAMAXSEN$ alors $STRESSPHOT = 1$

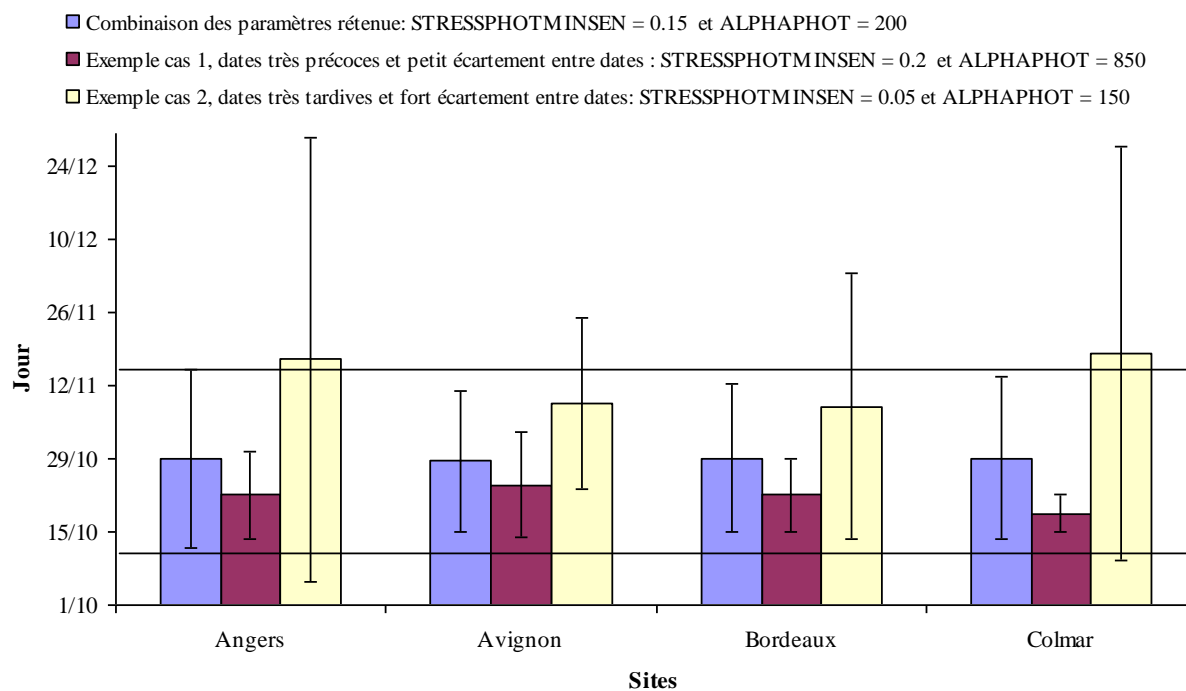
Si $PHOBASE < PHOI$ et $DLTAMS \geq DLTAMAXSEN$

$$\text{alors } STRESSPHOT = e^{(DLTAMS - DLTAMAXSEN) \cdot ALPHAPHOT}$$

Si $STRESSPHOT \leq STRPHOTMINSEN$ alors $STRESSPHOT = 0$

où $PHOI$ est la valeur de la durée du jour (en nombre d'heures) courant, $PHOBASE$ est la durée du jour (en nombre d'heures) à partir de laquelle l'effet de la photopériode est pris en compte ; $DLTAMSMAXSEN$ est le paramètre de vigueur qui annule l'effet de la photopériode et permet de retarder la sénescence ; $ALPHAPHOT$ est le paramètre qui va définir la rayon de courbure de l'exponentielle ; et $STRPHOTMINSEN$ est un seuil minimal à partir duquel on considère que l'activité photosynthétique de la plante n'a plus d'effet sur le retard de sénescence.

Figure 11 Exemple des jeux des paramètres testés pour déterminer les valeurs des paramètres qui vont décrire la sénescence en fonction des deux critères énoncés : 1) la sénescence peut se produire pendant le mois d'octobre et début novembre ; et 2) il peut avoir un décalage de 20 jours entre les différentes années, dans un même site.



8.3. Paramétrage et tests qualitatifs

Pour tester cette hypothèse et calculer la valeur des différents paramètres, une expérimentation par simulation a été réalisée sur quatre sites avec des conditions climatiques et latitudes différents : Bordeaux, Avignon, Colmar et Angers. Pour étudier la variabilité intra et interannuelle de la sénescence dans les différents sites, nous avons utilisé les données météorologiques de chacun de ces sites pour la période 1990 – 2002.

Pour s'affranchir de l'impact du stress hydrique et azoté sur la sénescence des feuilles, nous avons généré des situations hors stress dans les différentes parcelles. De cette façon, le seul élément qui joue sur la sénescence des feuilles est la durée du jour et son potentiel de croissance. Pour réaliser les simulations, les mêmes conditions d'itinéraire technique, les mêmes sols et une vigne générique ont été considérés dans les quatre sites.

Afin de diminuer le nombre de paramètres à estimer (*DLTAMSMAXSEN*, *ALPHAPHOT*, *STRPHOTMENSEN*, *PHOBASE*) nous avons décidé d'en fixer certains. *PHOBASE* a été fixé à une valeur de 12 heures, ce qui correspond à l'avis des experts des différentes régions, selon lesquels le jaunissement sans influence de stress commence après début octobre. *DLTAMSMAXSEN* a été fixé à une valeur de 0.01 t de MS/ha/jour, afin que l'ensemble des régions françaises puisse bénéficier de cet effet "vigueur", conformément à l'avis des experts.

La valeur de *STRPHOTMENSEN* et *ALPHAPHOT* a été déterminée en testant par simulation toute une gamme de valeurs de chacun des paramètres dans chacun des quatre sites : *ALPHAPHOT* égal à 1, 50, 100, 150, 200, 250, 450, 650 et 850 ; et *STRPHOTMENSEN* égal à 0.01, 0.05, 0.1, 0.15 et 0.2. Le couple des valeurs retenues correspond à des critères calendaires reproduits sur la Figure 11. Le premier de ces critères est que la sénescence de la vigne (sans stress) se produit entre début octobre et début novembre. Le second critère est que les différences climatiques inter-annuelles ne peuvent induire une variabilité de l'ordre de 20 jours sur l'ensemble de sites.

La combinaison de ces deux critères (en utilisant tous les couples des paramètres) a permis d'obtenir les valeurs *STRPHOTMENSEN* égale à 0.15 et *ALPHAPHOT* égale à 200 (Figure 11).

9. Conclusion

A l'issu de ce chapitre, nous estimons que le modèle STICS a la capacité de simuler le développement, la croissance, et la production de la vigne. Grâce à une visite en profondeur de l'ensemble des formalismes, nous avons pu mettre en adéquation le modèle avec les connaissances agrophysiologiques de la culture.

Nous avons ainsi effectué une nette amélioration de la simulation de la date de débourrement, introduit les spécificités de la maturation du raisin, analysé en détails les relations entre la structure du feuillage, l'intervention du viticulteur et l'interception du rayonnement, dimensionné la stockage et le destockage des réserves, intégré une meilleure description de la demande en azote de la plante, et enfin introduit l'effet de la photopériode et de la vigueur sur la sénescence des feuilles.

Ces améliorations vont permettre de réaliser une meilleure simulation de la croissance et du développement de la vigne et par ailleurs d'atteindre notre objectif d'étudier les impacts du réchauffement climatique de façon plus précise.

Cependant, l'adaptation du modèle à la vigne peut encore être améliorée par : l'introduction de la taille (charge de bourgeons), de la fertilité du cépage (nombre des grappes produites par bourgeon), de l'induction florale, de l'influence du porte-greffe, des stress biotiques (maladies cryptogamiques).

On pourrait également imaginer un couplage entre STICS et un modèle architectural (Iandolino et al., 2004 ; Lebon et al., 2005 ; Louarn, 2005 ; Louarn et al., 2005) pour mieux représenter la structure du feuillage avec en particulier la croissance secondaire des rameaux et l'impact des techniques de gestion du feuillage.

Chapitre II

CHAPITRE II

**Paramétrage et validation du modèle de culture générique STICS (v6.0)
pour la vigne**

1.	Description de la méthodologie utilisée pour le paramétrage et la validation du modèle.	105
2.	Bases de données et expérimentations	107
2.1.	Les deux bases de données de l'étude.....	107
2.2.	Type et organisation des données.....	115
2.3.	Détail des données d'entrée	117
2.4.	Détail des mesures comparable à des variables de sortie.....	121
3.	Outils statistiques d'optimisation et d'évaluation du modèle.....	125
3.1.	Optimisation	125
3.2.	Evaluation.....	127
4.	Paramétrage à partir de la bibliographie, par analogie ou par expérimentation.....	129
4.1.	Les températures cardinales de la physiologie de la vigne	129
4.2.	Développement.....	129
4.3.	Feuillage	131
4.4.	Interception du rayonnement.....	133
4.5.	Croissance en biomasse.....	135
4.6.	Répartition entre organes	135
4.7.	Compétition feuille-fruit (source-puits)	137
4.8.	Calcul du rendement.....	137
4.9.	Racines	141
4.10.	Gel	143
4.11.	Eau dans la plante.....	143
4.12.	Azote dans la plante	145
5.	Paramétrage par optimisation.....	147
5.1.	Méthode d'optimisation utilisée dans notre étude	147
5.2.	Optimisation des paramètres en utilisant le forçage du LAI.....	147
5.3.	Optimisation des paramètres plante sans forçage du LAI.....	149
5.4.	Qualité des résultats des optimisations.....	151
6.	Validation du modèle avec la Base de Données Historiques	159
6.1.	Méthode et variables de la validation du modèle	159
6.2.	Résultats de la validation.....	161
7.	Capacités et limites du modèle STICS pour simuler le fonctionnement de la vigne	163

1. Description de la méthodologie utilisée pour le paramétrage et la validation du modèle.

Nous abordons maintenant la deuxième partie de l'adaptation du modèle STICS à la culture de la vigne, qui concerne la détermination des différents paramètres décrivant la croissance, la structure et le développement de la plante. Le paramétrage de STICS pour une espèce donnée ne concerne pas l'ensemble des paramètres du modèle. Le nombre final de paramètres à affecter dépend des choix des formalismes (cf. § I). Par ailleurs, certains paramètres sont supposés dépendants de la variété, les autres sont supposés valables pour l'ensemble de l'espèce (nous avons été amenés à changer quelque peu cette classification). Nous nous appuyons sur la méthodologie proposée par Launay *et al.*, (2005) et Flenet *et al.*, (2005), qui comporte plusieurs voies de paramétrage :

- ❖ la recherche dans la **bibliographie** existante. Dans ce cas, la valeur du paramètre est directement obtenue à partir des travaux d'écophysiologie ou à partir d'autres modèles déjà existants sur la plante. Cependant, il est important de s'assurer que le paramètre trouvé dans la bibliographie correspond bien à la même définition que celle de STICS ;
- ❖ le calcul à partir de **données expérimentales** spécifiques. Dans certains cas, le paramètre est mesuré directement. Dans d'autres cas, toutes les variables du formalisme considéré sont mesurées et on estime le paramètre par un calcul analytique ;
- ❖ par **analogie** avec d'autres plantes. Certains paramètres peuvent être déterminés par analogie avec d'autres plantes (sur la croissance foliaire, la croissance racinaire et la courbe de dilution) ;
- ❖ par **optimisation**. Dans certains cas, la valeur du paramètre ne peut être obtenue par les méthodes citées précédemment. C'est notamment le cas si le paramètre a une valeur purement statistique ou s'il est très difficile de mettre en place des expérimentations pour le mesurer ou le calculer. Ces paramètres sont alors déterminés par optimisation. Une gamme de valeurs possibles de ce paramètre est examinée et la valeur qui minimise la différence entre les simulations et les mesures réalisées sur le terrain est retenue.

Une fois le modèle **adapté** (par le choix des formalismes et leur modification possible) et **paramétré** (par la détermination des valeurs des paramètres qui vont décrire la croissance et le développement de la plante), il est nécessaire de réaliser une validation qui permettra de tester sa robustesse dans des scénarios variés. Cette robustesse est définie comme la capacité de l'outil à fournir des résultats satisfaisants dans une gamme étendue des conditions.

Ce chapitre présente ces deux étapes : le paramétrage et la validation. Pour cela, nous adopterons le plan suivant :

- ❖ description des différentes bases de données utilisées, ainsi que les protocoles des expérimentations mises en place qui ont permis de le constituer ;
- ❖ description des différents critères statistiques qui seront utilisés pour l'estimation des paramètres et l'évaluation de la « robustesse » du modèle ;
- ❖ affectation des paramètres par bibliographie, analogie ou expérimentation ;
- ❖ affectation des paramètres par optimisation ;
- ❖ évaluation de la robustesse du modèle sur une base de données indépendante ;
- ❖ discussion sur les limites et les atouts du modèle, qui conclura cette partie.

Figure 12. Carte des différents vignobles de France. (Adapté de Nicolas® 2004)



2. Bases de données et expérimentations

2.1. Les deux bases de données de l'étude

2.1.1. Le cadre de collaboration expérimentale

Au cours des années 2004 et 2005, deux bases de données ont été créées avec l'objectif de réunir des données pour paramétrer et valider le modèle sur une gamme variée de vignobles français. Les vignobles choisis sont : Côtes du Rhône, Languedoc, Bourgogne, Bordeaux, Cognac, Val de Loire (centré sur l'Anjou et le Saumurois) et Champagne.

La première base de données est la Base de Données Ecophysiologiques (BDE), qui va servir à l'affectation des paramètres par expérimentation et par optimisation. La seconde est la Base de Données Historiques (BDH), indépendante de la première, et qui sera utilisée pour la validation du modèle. Ces bases de données ont été créées en collaboration avec différents organismes présents dans les différents vignobles de l'étude (Figure 12) :

- ❖ Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) :
 - Centre d'Avignon : Unité Mixte de Recherche « Climat–Sol–Environnement » - équipe « Modélisation de Cultures » ; Unité de Service « Agroclim »
 - Centre de Bordeaux : Unité Mixte de Recherche « Œnologie-Ampélogie » avec son équipe « Ecophysiologie et Agronomie Viticole »
 - Centre d'Angers : Unité Expérimentale « Vigne et Vin » du centre d'Angers
- ❖ Institut Technique de le Vigne et du Vin (ITV) :
 - Unité de Montpellier
 - Unité de Nîmes
 - Unité de Bordeaux
- ❖ Chambre d'Agriculture du Vaucluse – Groupe de Développement Agricole –section viticole
- ❖ Centre d'Information Agrométéorologique (CIRAME) (Vaucluse)
- ❖ Syndicat Général des Vignerons Réunis des Côtes du Rhône
- ❖ Bureau Interprofessionnel des Vins de Bourgogne (BIVB) – Responsable de l'Observatoire Millésime
- ❖ Institut Universitaire de la Vigne et du Vin – Institut Jules Guyot (Bourgogne)
- ❖ Centre Interprofessionnel des Vins de Champagne (CIVC) – Service Technique
- ❖ Inter-Loire
- ❖ Bureau Interprofessionnel des Vins de Cognac (BNIC) – Service Technique

Ces organismes ont été impliqués à différents niveaux selon leur disponibilité et leur vocation. La motivation des interlocuteurs de ces organismes a permis de mettre en place un réseau expérimental apte à répondre à notre problématique : représentativité de l'hétérogénéité des conditions de culture de la vigne permettant de paramétrer le modèle de la façon la plus large possible.

2.1.2. Les climats des régions viticoles concernées

Les climats des vignobles de l'étude sont décrits globalement, ce qui permet d'avoir un aperçu général de la diversité climatique à l'échelle régionale. Une analyse plus précise du climat des années expérimentales (2003 – 2005) sera fournie dans la partie qui concerne la BDE (cf.§II.2.1.3.).

- *Côtes du Rhône Méridionales*

Le climat de ce vignoble est considéré comme étant de type méditerranéen. Il présente trois caractéristiques principales : une répartition très irrégulière des pluies ; une propension à des périodes de chaleur intense et à une sécheresse plus ou moins importante ; un régime de vents violents, dominé par le mistral (vent du nord). La pluviométrie annuelle varie entre 400 et 1000mm. Ces caractéristiques sont plus ou moins accentuées selon la proximité du Rhône et des montagnes qui entourent la vallée du Rhône. La durée d'insolation est d'environ 2800 heures.

- *Bourgogne*

Le climat de ce vignoble se situe à la limite des influences continentales et maritimes. Il est confronté aussi bien aux vents d'ouest (vents humides) qu'aux vents du nord (vents secs). La pluviométrie se répartit à peu près également tout au long de l'année (entre 700 et 1250mm selon l'altitude). Il y a de forts risques de gel ainsi que de grêle. Les évolutions thermiques sont très rapides et l'été est plutôt chaud avec un nombre moyen de jours d'orage assez élevé. La durée d'insolation annuelle est d'environ 1800 heures.

- *Champagne*

Le climat de ce vignoble est de type océanique de transition avec des influences continentales vers l'Est. Il est marqué par un nombre important de jours de gelées et par une répartition des pluies relativement homogène. Cependant, la quantité de pluie annuelle varie entre la plaine (500 mm) et la montagne de Reims et l'Est du département (1000 mm) avec des épisodes pluvieux estivaux à caractère bref et intense (orages et grêle). La durée d'insolation annuelle est d'environ 1700 heures.

- *Val de Loire*

Le Val de Loire est un vignoble qui s'étend sur plusieurs régions et climats différents. Dans ce travail, nous allons nous centrer sur les caractéristiques de la zone d'étude : le vignoble d'Anjou et de Saumur. Dans cette zone, le climat est de type océanique de transition. Cela permet l'exposition à des températures douces en hiver, des étés assez chauds et des températures encore élevées en septembre et octobre. Il présente un ensoleillement moyen (environ 1800 heures d'insolation) bien reparti toute l'année. La pluviométrie moyenne annuelle est de 600 mm.

- *Cognac*

Le climat de ce vignoble est de type océanique. Il est marqué par des hivers frais et pluvieux et des étés secs et relativement chauds mais très irréguliers. Il présente un fort ensoleillement (2025 heures). La moyenne annuelle des précipitations est de 860 mm. Les vents dominants viennent des secteurs sud-ouest et nord-ouest.

- *Bordeaux*

Le climat de ce vignoble est également océanique avec une importante influence maritime. Les hivers sont doux et les températures estivales plutôt chaudes. Les pluies sont réparties sur toutes les saisons (entre 700 et 900 mm), mais elles sont plus importantes en automne et en hiver. Les vents océaniques,

Tableau 8. Récapitulation des données récupérées dans les différentes bases des données.

	BDE	BDH
Jeux de données complets	43	347
Régions	Côtes du Rhône Méridionales, Languedoc, Bordeaux, Cognac, Bourgogne, Val de Loire, Champagne	Côtes du Rhône Méridionales, Languedoc, Bordeaux, Cognac, Val de Loire, Champagne
Cépages	<i>Vitis vinifera</i> L. cv. Grenache, Syrah, Pinot noir, Chardonnay, Chenin, Cabernet franc, Ugni blanc, Merlot	<i>Vitis vinifera</i> L. cv. Grenache, Syrah, Pinot noir, Chardonnay, Chenin, Cabernet franc, Ugni blanc, Merlot, Cabernet Sauvignon
Types de sols renseignés	13	65
Climats	7 (toutes les variables)	6 (toutes les variables)
Années	2003, 2004 et 2005	1992-2005
Modes de Conduite	Guyot simple et double, cordon simple et double, chablis	Guyot simple et double, cordon simple et double, chablis
Densités de plantation	0.27 – 1 ceps/m ²	0.27 – 1 ceps/m ²
NON irriguées & NON enherbées		

Tableau 9. Comparaison des années 2003, 2004 et 2005 avec la période de référence 1990 – 2002 pour chacune des régions. La période étudiée est comprise entre le 1^{er} Avril et le 31 Octobre.

Station Météorologique	Position	Moyenne 1990 - 2002								
		Tn °C		Tx °C		Tm °C		Cumul Pluie		
		Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	
Champagne	Epernay	49°3', 3°57'	9.4	0.6	20.5	0.5	14.8	0.5	392	97
Bourgogne	Dijon	47°19', 5°2'	9.9	0.5	21.2	0.5	15.3	0.4	474	92
Val de Loire	Montreuil Beally	47°7', 0°7'	11.0	0.5	21.9	0.7	16.1	0.6	340	110
Bordeaux	Bordeaux	44°47', 0°34'	12.6	0.4	23.2	0.7	17.4	0.5	540	141
Cognac	Cognac	45°41', 0°19'	12.0	0.5	22.5	0.7	17.3	0.5	440	96
Côtes du Rhône	Avignon	43°55', 4°50'	13.3	0.4	25.0	0.6	18.8	0.4	498	118
Languedoc	Montpellier	43°21', 3°31'	14.6	0.4	24.7	0.6	19.5	0.5	469	152

* Données issues de Météo-France. Les autres données sont issues de stations météorologiques de l'INRA.

Station Météorologique	Position	2004				2005				
		Tn °C	Tx °C	Tm °C	Cumul Pluie	Tn °C	Tx °C	Tm °C	Cumul Pluie	
		Moy.	Moy.	Moy.	Moy.	Moy.	Moy.	Moy.	Moy.	
Champagne	Epernay	49°3', 3°57'	9.7	20.8	15.0	314	10.1	21.5	15.6	358
Bourgogne	Dijon	47°19', 5°2'	10.1	21.4	15.5	564	10.7	22.5	16.3	394
Val de Loire	Montreuil Beally	47°7', 0°7'	11.0	22.3	16.3	318	11.5	23.4	17.1	257
Bordeaux	Bordeaux	44°47', 0°34'	12.9	23.4	17.7	491	13.1	24.6	18.3	373
Cognac	Cognac	45°41', 0°19'	12.4	22.8	17.6	386	12.7	23.8	18.3	323
Côtes du Rhône	Avignon	43°55', 4°50'	13.6	25.9	19.4	313	14.1	25.8	19.5	407
Languedoc	Montpellier	43°21', 3°31'	14.5	24.7	19.3	340	15.0	25.6	20.1	255

Station Météorologique	Position	2003				
		Tn °C	Tx °C	Tm °C	Cumul Pluie	
		Moy.	Moy.	Moy.	Moy.	
Côtes du Rhône	Avignon	43°55', 4°50'	14.4	27.5	20.5	361

soufflant du nord-ouest ou du sud-ouest, dominant largement. Les brouillards sont assez fréquents et l'ensoleillement varie entre 2000 et 2200 heures.

- *Languedoc*

Le climat de ce vignoble est de type méditerranéen, avec des hivers doux et des étés secs et chauds. Les pluies sont rares (moins de 80 jours), irrégulières et mal réparties, avec des épisodes torrentiels à l'automne (pluviométrie annuelle entre 400 et 800mm). Les vents ont aussi de l'importance, car ils sont secs et violents (le mistral, le cers et la tramontane). L'insolation est d'environ 2700 heures.

2.1.3. Base de Données Ecophysiologiques (BDE)

- *Contexte agronomique et expérimentale*

Les parcelles du réseau mises en place au cours des années 2004 et 2005, en étroite collaboration avec les organismes présents dans chacune des régions viticoles, sont avec un mode de conduite compatibles avec les hypothèses de fonctionnement du modèle (cf.§.I.), et de plus **non irriguées et non enherbées**.

Les caractéristiques principales de ces parcelles sont résumées dans l'annexe I. Dans la plupart des cas, les parcelles sélectionnées font partie d'essais, d'expérimentations ou de parcelles de contrôle des différents organismes. Nous avons pu ainsi réunir 43 jeux complets de données correspondant à des situations agroclimatiques variées (Tableau 8), comprenant 8 cépages (*Vitis vinifera* L. cv. Grenache, Syrah, Pinot noir, Chardonnay, Chenin, Cabernet franc, Ugni blanc, Merlot).

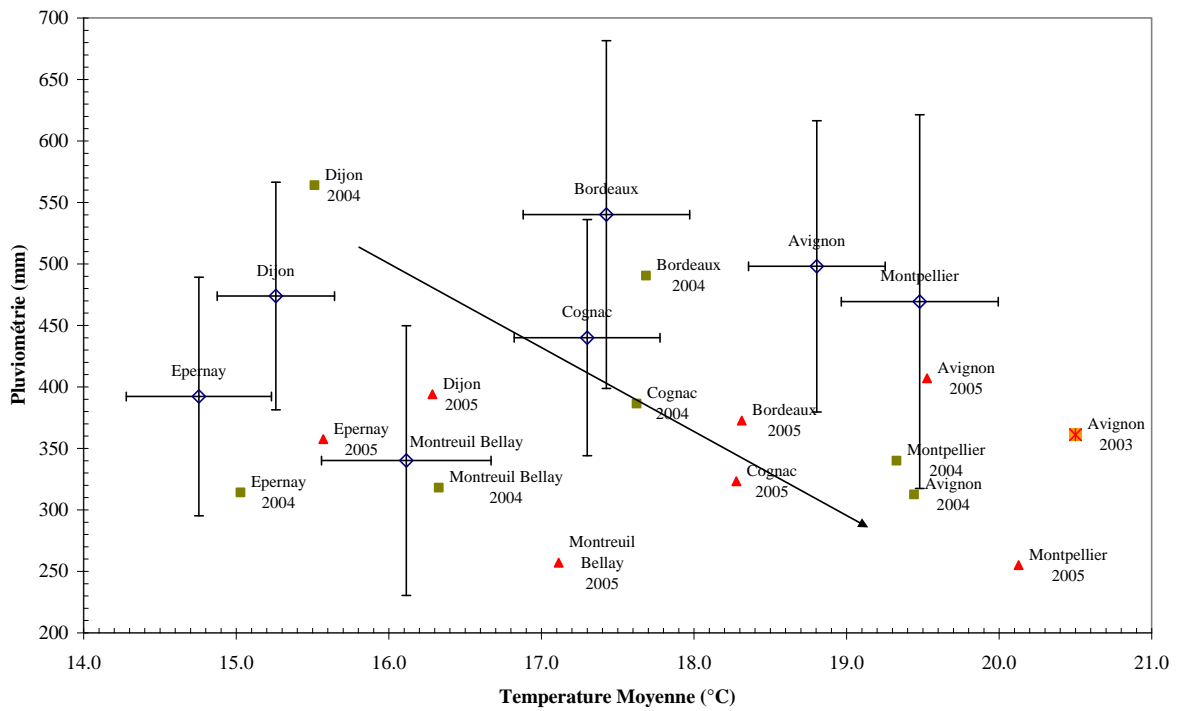
Un protocole d'expérimentation pour réaliser les prélèvements et les mesures a été réfléchi de façon à obtenir des données homogènes. Le protocole de prélèvements a dû être adapté à chaque parcelle selon le type de taille utilisé sur la parcelle : Guyot Simple et Double, Cordon Royat Simple et Double, Chablis. Dans chaque parcelle, un bloc homogène est délimité avec le nombre de ceps nécessaire pour faire tous les prélèvements pendant deux ans sans manipuler deux fois le même cep (sauf dans la parcelle SerSc qui a seulement été utilisée en 2003). La méthode d'échantillonnage est décrite dans l'Annexe II.

- *Contexte climatique*

Les températures moyenne, minimale et maximale, ainsi que la pluviométrie du cycle végétatif (du 1er avril au 31 octobre) des années d'expérimentation ont été comparées aux valeurs moyennes de la période 1990 - 2002. Une station météorologique de référence a été choisie dans chacune des régions, selon sa situation par rapport au vignoble et aux parcelles utilisées dans les expérimentations (Tableau 9). L'année 2003 n'a pas été introduite dans la série climatique de référence (années 1990 – 2002) en raison de l'impact de cette année sur les valeurs moyennes et les écart-types. Cependant, les valeurs des caractéristiques climatiques principales de l'année 2003 sont présentées pour la station d'Avignon puisque des données expérimentales ont été acquises cette année-là sur le vignoble des Côtes du Rhône Méridionales.

D'une manière générale (Tableau 9), en terme de températures minimale, maximale et moyenne, l'année 2004 se situe dans les valeurs moyennes attendues pour chaque région. Seule la région des Côtes du Rhône montre des températures maximales et moyennes plus élevées que la moyenne. En revanche, l'année 2005 fut très chaude dans toutes les régions. Cet effet est moins marqué pour les températures minimales, alors que les températures maximales et moyennes montrent une différence plus importante (presque 1°C de différence à Montreuil Bellay).

Figure 13. Distribution des différentes régions viticoles de l'étude en fonction de la température moyenne et du cumul de pluviométrie sur la période végétative de la vigne (1^{er} Avril – 31 octobre) : les losanges ouverts montrent les moyennes et écart-types historiques (1990-2002), et données de 2003 à Avignon, et de 2004 et 2005 pour tous les sites. La flèche représente la tendance climatique des années 2004 et 2005 vers des températures plus chaudes et des pluviométries plus basses sur les zones de l'étude.



Plus remarquable est le cas de la pluviométrie. En effet, en 2004 la pluviométrie est inférieure à la moyenne (sauf à Dijon), et dans le cas d'Avignon, elle est même inférieure aux valeurs minimales moyennes (313 mm). Pour l'année 2005, la tendance aux faibles pluviométries se généralise et dans plusieurs cas elle descend en dessous des valeurs considérées minimales (Bordeaux, Cognac et Montpellier). La valeur d'Avignon en 2005 est importante uniquement du fait des fortes pluies du 5 au 8 septembre 2005 (87mm).

L'année 2003 est considérée séparément car une seule expérimentation a été réalisée dans la région Côtes du Rhône Méridionales. L'année 2003 a été une année très chaude, avec un épisode de canicule pendant la saison d'été (températures dépassant les 40°C). Cependant, la pluviométrie se trouve dans les valeurs moyennes observées (ceci est dû aux forts épisodes pluvieux du mois de septembre : 48.5, 22.5 et 52.5 mm en trois jours).

En résumé, les années 2004 et 2005 sont des années différentes de la moyenne calculée sur la série climatique 1990 - 2002. Si en terme de température, l'année 2004 peut être considérée comme une année moyenne, l'année 2005 est considérée comme plutôt chaude. Dans les deux cas, la pluviométrie reste faible, même si l'année 2005 montre la situation la plus accentuée. L'année 2003 est une année exceptionnellement chaude. La Figure 13 montre la distribution climatique des différents vignobles en fonction de la température moyenne et du cumul de la pluviométrie au cours du cycle végétatif de la plante. Ce type de représentation graphique permet de mettre en évidence le caractère sec et chaud des années 2003, 2004 et 2005.

Finalement, les données étudiées montrent une importante gamme climatique : 4.8°C de différence de température moyenne entre la région la plus froide (Champagne) et la plus chaude (Languedoc) ; et jusqu'à 200 mm de différence de cumul de pluviométrie entre la région la plus humide (Bordeaux) et la région la plus sèche (Val de Loire). La possibilité de pouvoir se doter d'un jeu des données comprenant une telle variabilité climatique est un atout pour tester la robustesse des paramètres du modèle.

2.1.4. Base de Données Historiques (BDH)

Pour construire la BDH, les collaborations avec les différents organismes viticoles ont été étendues. Les données sont issues d'expérimentations anciennes ou actuelles de ces organismes. L'objectif était de regrouper le maximum de jeux de données complets pour faire tourner le modèle, avec une exigence plus limitée concernant les variables comparables aux sorties. Les parcelles retenues obéissent aux mêmes critères que pour la BDE : parcelles sans irrigation, ni enherbement. Dans certains cas, les données récupérées sont issues d'expérimentations réalisées sur la même parcelle, mais avec la variation d'un seul élément (le cépage, la taille, la charge en grappes, la fertilisation, le travail du sol, le porte-greffe ou le rognage). Cela est lié aux différents objectifs et programmes de recherches des organismes participants. Pour obtenir un jeu de données le plus large (en terme de situations étudiées) et le plus précis possible, il a été décidé de garder chaque modalité comme une situation (notion d'USM cf. paragraphe suivant). Nous avons pu ainsi réunir pour la BDH 347 jeux complets de données correspondant à des situations agroclimatiques variées (Tableau 8), comprenant 9 cépages (*Vitis vinifera* L. cv. Grenache, Syrah, Pinot noir, Chardonnay, Chenin, Cabernet franc, Ugni blanc, Merlot, Cabernet franc).

Tableau 10. Organisation des différentes variables mesurées dans les différentes bases des données.

	BDE	BDH
Dynamique du développement (Stades phénologiques)	OUI	OUI
Dynamique de la croissance (LAI, Biomasse, Quantité d'azote dans la plante, Poids de bois de taille)	OUI	
Composantes du rendement (Poids de 200 baies, Nombre de grappes)	OUI	OUI
Dynamique hydrique (Teneur en eau du sol, Potentiel de base)	OUI	
Dynamique Maturité des baies	OUI	
Mesures de la Qualité du raisin à la récolte (Teneur en sucre, Acidité, Anthocyanes, Azote assimilable)	OUI	OUI

2.2. Type et organisation des données

2.2.1. Pour faire tourner le modèle (Données d'entrée)

Les données indispensables pour faire tourner le modèle sont celles qui caractérisent une situation agronomique supposée homogène, correspondant à la parcelle du viticulteur ou à une portion de cette parcelle si celle-ci est hétérogène. Ces données comprennent :

- ❖ les caractéristiques permanentes du sol ;
- ❖ les variables climatiques journalières ;
- ❖ les pratiques culturales (fertilisation, irrigation, travail du sol, rognage, etc.) ;
- ❖ les données qui caractérisent l'état initial du système sol-plante, c'est-à-dire l'état hydrique et azoté du sol, ainsi que l'état de croissance et de développement de la vigne, au début de la simulation.

2.2.2. Pour estimer les paramètres ou valider le modèle (variables de sortie)

Il s'agit des variables qui caractérisent le système à un moment de la simulation : la biomasse des feuilles aux différents stades de développement, l'indice foliaire, le rendement à la récolte, l'humidité du sol au cours du cycle cultural, etc... Ces variables ont été choisies en fonction de plusieurs critères : leur capacité à être mesurées (possibilité de mise en place des expérimentations et des analyses), leur pertinence (importance dans l'évaluation du modèle), leur signification d'un point de vue technique, etc...

Ces variables serviront soit à réaliser des optimisations pour estimer les paramètres caractérisant la plante (variables mesurées dans la BDE), soit à évaluer la robustesse du modèle (variables mesurées dans la BDH). Les variables sont beaucoup plus nombreuses dans le cas de la BDE (Tableau 1-Annexe I), spécifiquement mise en place pour ce travail, que pour la BDH, qui ne comporte que des mesures ou observations de routine (développement, rendement, qualité) (Tableau 10).

2.2.3. Les autres données

De nombreuses données complémentaires, non utiles au modèle, ont été acquises ; elles décrivent la qualité de la production : acidité totale, malique, tartrique, pH, azote dans les moûts, anthocyanes.

2.2.4. Organisation des bases de données

- *Notion de USM*

Une unité de simulation (USM) est une combinaison d'une situation pédoclimatique, avec une culture et une gestion technique. Une USM rassemble toutes les informations nécessaires pour faire une simulation : les caractéristiques du sol et son contenu initial en eau et en azote, les caractéristiques écophysiologicalues et agronomiques de la culture et son état initial de croissance et développement, toutes les actions de l'itinéraire technique réalisées sur la culture et le sol pendant le cycle cultural, les conditions climatiques journalières pendant la période de simulation, et naturellement les dates de début et fin de simulation définies par l'utilisateur du modèle. Dans la pratique, un fichier USM inclut les noms du fichier sol (*.SOL), du fichier plante (*.PLT), des fichiers climatiques (un fichier

Tableau 11. Informations nécessaires pour faire une simulation avec le modèle STICS.

A.- Données Description de la Parcelle	
A1.-	Le cépage
A2.-	La densité de plantation (inter-rang, écartement des ceps)
A3.-	Orientation des rangs : N-S, E-O...
A4.-	Structure: Hauteur de la base du feuillage, hauteur et largeur maximale du feuillage
B.- Données Itinéraire Technique	
B1.-	Apports d'engrais minéral (type, quantité et jour d'apport)
B2.-	Apports d'engrais organique (type, quantité et jour d'apport)
B3.-	Dates et profondeur de travail du sol (cm)
B4.-	Effeuilage (jour et position)
B5.-	Jour de taille et traitement du bois de taille
B6.-	Rognage : jour, hauteur (cm) et largeur (cm) de gabarit après rognage.
B7.-	Eclaircissage (nombre de grappes avant et après)
C.- Données Sol	
<i>Information nécessaire seulement pour le premier horizon</i>	
C1.-	Teneur en CaCO ₃ du premier horizon (%)
C2.-	Teneur en azote organique du premier horizon (%)
C3.-	Albédo du sol sec
C4.-	Teneur en argile de la couche de surface (%)
C5.-	Profondeur d'humification (cm)
C6.-	Limite d'évaporation de la phase potentielle d'évaporation du sol (mm) – <i>Q0</i>
<i>Information nécessaire pour tous les horizons</i>	
C7.-	Profondeur de chaque horizon (cm)
C8.-	Texture ou granulométrie de chaque horizon (dans ce cas, nous utilisons les règles pédotransfert) ou directement les valeurs des humidités caractéristiques (à capacité au champ - <i>HCCF</i> et au point de flétrissement - <i>HMINF</i>)
C9.-	Densité apparente (g cm ⁻³)
C10.-	Teneur et type des cailloux de chacun des horizons (%)
C11.-	Profondeur de l'obstacle racinaire (cm) - <i>OBSTARAC</i>
<i>Autres informations</i>	
C12.-	Remontées capillaires (mm j-1)
C13.-	humidité minimale pour activation des remontées capillaires (g eau g sol ⁻¹)
D.- Données Climat	
D1.-	Latitude de la station
D2.-	Température minimale (°C)
D3.-	Température maximale (°C)
D4.-	Pluviométrie (mm)
D5.-	Rayonnement Global (MJ/m ² /jour)
D6.-	Humidité de l'air (%)
D7.-	Vent (m/s)
E.- Initialisations	
E1.-	Teneur en eau de chacun des horizons au début de la simulation (%)
E2.-	Teneur en azote de chacun des horizons au début de la simulation (%)
E3.-	Quantité des réserves carbonées au début de la simulation (t/ha)
E4.-	Quantité des réserves azotées au début de la simulation (kg/ha)
E5.-	Densité racinaire de chacun des horizons (cm/cm ³)
E6.-	Stade initial du développement de la plante

climatique par année calendaire dont l'extension correspond au millésime, par exemple Avignon.05 pour l'année climatique 2005 sur la station météorologique d'Avignon), du fichier technique (*.TEC).

Tous ces fichiers ont un format spécifique au modèle. Selon les objectifs de l'utilisateur, l'USM peut être créée pour simuler des cycles annuels de la culture, ou pour réaliser des enchaînements d'années de culture.

- *Support informatique des bases de données*

Les données des deux bases de données ont été stockées dans des fichiers au format Excel (Microsoft 2002), à l'exception des variables climatiques, qui ont été directement stockées dans le format spécifique du modèle STICS (fichiers annuels).

Les données de la BDE ont été stockées dans un même fichier, alors que pour celles de la BDH, nous avons créé un fichier par région. Chaque fichier comporte une feuille contenant les données caractérisant les itinéraires techniques, une pour les données sol, une pour les variables qui allaient servir à la validation (données mesurées), une pour décrire les USM, et une pour les commentaires sur les modifications et origines des données (métadonnées). Dans chaque feuille, l'information a été organisée de façon à ce que chaque ligne corresponde à une situation donnée : un itinéraire technique, un sol, une USM, une date d'observation. Des procédures informatiques ont permis de récupérer ces informations et de les mettre aux formats des fichiers d'entrées de STICS.

Dans le cas du fichier de la BDE, nous avons gardé les différentes données relatives au sol depuis la valeur initiale (valeur mesurée ou estimée), jusqu'à la valeur finale (paramètre ajusté par inversion du modèle à partir du potentiel de base) (cf.§.I.4), afin de garder une traçabilité de nos calculs.

2.3. Détail des données d'entrée

2.3.1. Sol

Les données qui décrivent les sols (Tableau 11) proviennent des prélèvements in situ soit dans des fosses pédologiques, soit avec une tarière, cette dernière méthode n'étant possible que dans les sols viticoles sans cailloux (cf. Tableau 3-Annexe I). La teneur en cailloux des différents horizons a été estimée à partir de l'observation des fosses pédologiques. Les prélèvements ont donné lieu à des analyses, desquelles on a pu extraire directement les valeurs de certains paramètres de surface : la quantité d'argile, la teneur en N organique, et le CaCO₃. Pour ce qui concerne les caractéristiques hydrodynamiques du sol (capacité au champ, point de flétrissement, densité apparente), des rares mesures en laboratoire ont été effectuées, mais la plupart du temps elles ont été estimées à partir des règles de pédotransfert. Dans ce cas, nous avons utilisé la règle de pédo-transfert de Rawls-Brakensieks (1989) programmé dans le logiciel SOILPAR2 (Acutis et Donatelli, 2003). Il existe des paramètres particuliers à STICS (paramètre d'évaporation du sol, albédo du sol sec, obstacle racinaire), qui ont été estimés à partir des règles de pédotransfert fournies dans la notice de STICS. Le ruissellement a été négligé, ainsi que la composante ammoniacale du sol. Par ailleurs la profondeur d'humification a été considérée constante égale à 30cm (Brisson, 2002c). Ceci est basé Dans le cas de Champagne et de Cognac (ou un travail spécifique a été fait pour caractériser le sol : Fournier, 2004), nous avons fait l'hypothèse qu'il existe des remontées capillaires évaluées à 1mm par jour dès que l'humidité du sol en profondeur atteint le point de flétrissement permanent. Dans le cas de la BDE, un certain nombre de ces paramètres ont été réestimés par inversion de la mesure du potentiel de base (cf.§.I.4 et §II.5.2.1.).

Tableau 12 Données des itinéraires techniques des différentes parcelles de la Base de Données Ecophysiologiques.

Vignoble	Code Parcelle	Travail du sol	Apport Organique	Apport N minéral	Rognage	Eclaircissage	Effeuilage	Broyage de sarments
Cotes de Rhone	PioGr	Oui			Oui			Oui
	PioSy	Oui			Oui			Oui
	SerSc	Oui			Oui			Oui
	SerGr	Oui			Oui			Oui
	SerSy	Oui			Oui			Oui
Bourgogne	MarPi				Oui			
	MarCy				Oui			
	MbaPi	Oui			Oui		Oui	
Champagne	FchPi				Oui			Oui
	FchCy			Oui (2005)	Oui			Oui
	PluPi		Oui (2005)		Oui			Oui
	PluCy		Oui (2005)		Oui			Oui
Val de Loire	MbChR				Oui			
	MbChS				Oui			
	MbCfR				Oui			
	MbCfS				Oui			
Cognac	SigUb	Oui	Oui		Oui			Oui
	JuiUb	Oui		Oui	Oui			Oui
Bordeaux	Bgrmer	Oui			Oui	Oui		
	Barmer	Oui			Oui	Oui		
Languedoc	BolGr				Oui			Oui
	BolSy				Oui			Oui
	SauGr			Oui (2004)	Oui			Oui

L'année entre parenthèses signifie que la tache seulement a été réalisée l'année marqué.

2.3.2. Climat

Il est nécessaire d'avoir les données climatiques au pas de temps journalier sur l'ensemble de la période de simulation. Ces données sont (Tableau 11) : températures minimales et maximales, humidité moyenne, vent, rayonnement solaire, pluviométrie, et latitude de la station météorologique. Nous avons recherché les données météorologiques les plus proches des différentes parcelles d'étude : dans la plupart des cas, les données ont été mesurées directement sur la parcelle, mais dans certains cas nous avons utilisé la station météorologique disponible la plus proche (cf. Tableau 3-Annexe I). Les différentes stations météorologiques utilisées respectent les normes de l'Organisation Mondiale de Météorologie (OMM).

2.3.3. Itinéraire technique

Dans le cadre des expérimentations dédiées à cette étude (BDE), les parcelles ont été conduites selon les modalités de chaque exploitant, ce qui les rend homogènes avec les données de la BDH. Le

Tableau 12, construit dans le cadre de la BDE, montre les différentes techniques culturales (travail du sol, fertilisation, éclaircissage, rognage, effeuillage, taille) réalisées dans les parcelles, utiles pour renseigner le modèle.

Rappelons que le modèle STICS ne simule pas l'interaction entre la plante et les bioagresseurs (parasites, maladies cryptogamiques, mauvaises herbes...), et ne prend pas en compte les traitements phytosanitaires. Il fait l'hypothèse que l'état sanitaire de la parcelle est suffisamment bon pour que les bioagresseurs ne limitent pas la croissance de la plante, ce qui dans certains cas n'est pas vérifié. Des informations ont été également recueillies sur l'état sanitaire de la parcelle et le critère de déclenchement de la récolte (présence de botrytis ou rapport sucre-acidité).

2.3.4. Initialisations

Dans le cadre de cette étude, nous n'avions pas de renseignement sur l'état initial des parcelles pour certaines données relatives au sol et à la plante, pour aucune des deux bases de données.

- *Etat initial du sol*

Pour initialiser correctement l'état hydrique et azoté du sol, nous avons fait commencer toutes les simulations l'année précédant l'expérimentation, cette année de "chauffe" sert à reproduire le bilan hydrique et la minéralisation saisonnière. En effet, la vigne n'étant ni fertilisée ni irriguée avant notre expérimentation, la disponibilité en eau et azote est dépendante des conditions climatiques combinées aux caractéristiques du sol. Cette hypothèse a été confirmée par des tests de simulations : nous avons un remplissage total de la réserve en eau pendant l'hiver précédant la culture et l'état azoté du sol au débourrement est uniquement fonction du bilan minéralisation-lessivage de l'année de chauffe.

- *Etat initial de la plante*

Dans le cas de la plante, les variables à initialiser décrivent son état de développement et son état trophique au début de la simulation.

Le stade de développement initial choisi pour la vigne est l'entrée en dormance. Le choix de ce stade initial est justifié par le fait que le déterminisme phénologique du cycle de la vigne démarre l'année d'avant pour prendre impérativement en compte la phase de dormance. (cf. § II).

L'état initial correspond aux réserves carbonées et azotées, ainsi qu'aux profils des racines dans le sol.

L'estimation de la valeur des réserves carbonées dans la plante a été faite à partir d'un travail conjoint avec l'UMR Ecophysiologie & Agronomie Viticole (INRA Bordeaux). Elle repose sur le calcul du volume du tronc pour chaque type de taille (Jean Pierre Gaudillere *comm. pers.*) et sur les hypothèses de structure des organes de réserve de Castelan-Estrada (2001) : la masse des troncs et des racines est constituée respectivement de 20 et 25% de réserves, la masse de racines à 66% de la masse du tronc, et la densité moyenne du bois de 0.5gr/cm³. Evidemment, ces calculs donnent des valeurs des réserves indépendantes de l'année climatique, ce qui au premier ordre est conforme avec la connaissance actuelle.

Les valeurs des réserves azotées découlent des estimations précédentes. En effet, selon les travaux de Zapata (1998) et de Gourieroux (2003), la concentration en azote des parties aériennes de l'année en cours (rameaux et feuilles sans les grappes) est la même que celle des parties pérennes (tronc et racines) à la récolte. Nous avons estimé cette concentration à partir des données de la BDE, elle est de 0.55% (± 0.09), pour le tronc, et 1% pour les racines (Bates *et al.*, 2002) (Tableau 6-Annexe I).

La dernière information nécessaire sur la plante, concerne la distribution des racines dans les différents horizons du sol. Les deux variables à renseigner sont : la profondeur du front racinaire et les densités racinaires (cm/cm³) dans les différents horizons. Dans le cas de la BDE, ces variables ont été déterminées par des observations sur le terrain (mesures dans des fosses pédologiques) et par la méthode d'inversion du modèle pour la simulation du potentiel de base montrée dans le chapitre 1. Dans le cas de la BDH, les données ont été renseignées à partir de mesures effectuées sur le terrain, ou bien à partir d'estimations faites en prenant en compte les informations sur le sol fournies par les analyses et les responsables des parcelles.

2.3.5. Options de simulation

A diverses reprises, nous avons été amenés à utiliser plusieurs options de simulation du modèle : le forçage du LAI et le forçage de dates phénologiques. Ces deux types de forçages nous ont permis de nous affranchir, à certaines étapes de l'optimisation, des erreurs éventuelles sur le calcul du LAI et/ou du développement phénologique (cf. § II.5).

Par ailleurs, nous avons choisi comme critère de décision de récolte la teneur en eau des fruits. Cette teneur a été fixée à partir des valeurs mesurées dans les différentes parcelles (à partir de la relation entre la teneur en sucre et la teneur en eau) (cf. § I.4).

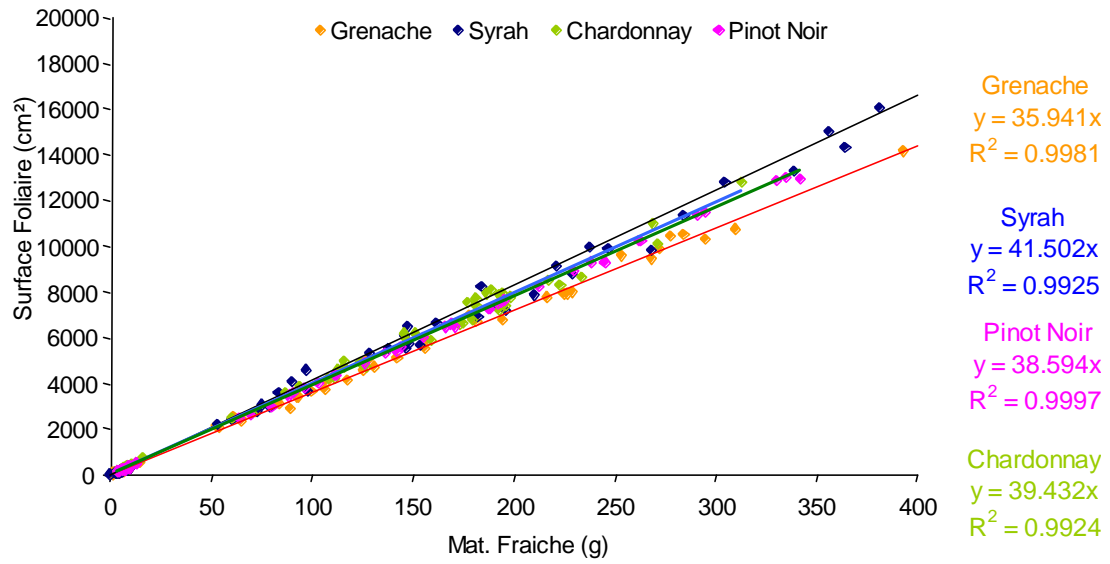
2.4. Détail des mesures comparable à des variables de sortie

Ces mesures ont été réalisées par chacun des organismes responsables de chaque parcelle.

2.4.1. Développement

Les stades phénologiques relevés pour contrôler le développement de la vigne sont référencés dans l'échelle d'Eichhorn et Lorenz, (1977) : le stade débourrement (stade 4) ; le stade floraison (stade 23) ; le stade véraison (stade 36). La récolte n'est pas considérée comme un stade phénologique, car nous n'avons pas déterminé un critère commun à toutes les parcelles pour réaliser les vendanges. Dans tous les cas, le critère utilisé pour déterminer la date qui définit le stade, est celui de 50% de la population ayant atteint le stade phénologique observé.

Figure 14 Relation entre la biomasse fraîche des feuilles (en prenant en compte le pétiole) et leur surface (masse surfacique fraîche – g/cm²) dépendante de la variété. Exemple pour les variétés Chardonnay, Pinot Noir, Grenache et Syrah (année 2004).



2.4.2. Croissance de la plante

Les mesures ont été réalisées à cinq moments du cycle de la vigne : autour du stade cinq feuilles étalées (stade 12) ; au stade floraison (stade 23) ; au stade véraison (stade 36) ; à la récolte ; à la taille en hiver. Ces mesures ont été réalisées seulement dans le cadre de la BDE ; il s'agit toujours de mesures destructives.

L'objectif de chaque prélèvement était d'obtenir des données représentatives de l'état général de la parcelle. Dans le cadre de cette étude, l'objectif était de collecter des informations sur la biomasse aérienne et l'azote de la plante, la mesure était donc nécessairement destructive. Pour cela, l'échantillonnage était fait de façon à obtenir l'équivalent de trois ceps, en regroupant entre 20 et 30 échantillons à la résolution du rameau ou du courson, de façon à prospecter l'ensemble de la parcelle (Annexe II). Au laboratoire, chaque échantillon a été divisé en trois parties : 1) feuilles (primaires et secondaires avec limbe et pétiole) ; 2) rameaux (primaires et secondaires, y compris les vrilles) ; 3) grappes. Les mesures ont été réalisées sur chacune de ces parties.

- *LAI*

Le LAI est la surface foliaire recto totale par unité de surface du sol. Pour calculer le LAI, on utilise seulement les feuilles vertes (les feuilles considérées comme photosynthétiquement actives). La mesure de la surface foliaire en viticulture a été très étudiée (Carbonneau, 1976 ; Sepulveda et Kliewer, 1983 ; Patakas et Notsiakakis, 1999 ; Ollat *et al.*, 1998 ; Tregoat *et al.*, 2001, Castelan-Estrada *et al.*, 2002 ; Williams et Martison, 2003 ; Weiss *et al.*, 2003). Nous avons préféré la méthode destructive à la méthode allométrique, car nous avons besoin des échantillons pour les autres mesures.

Pour chaque site-cépage-jour de prélèvement, sur un sous-échantillon constitué d'un tiers des échantillons prélevés, nous avons réalisé des mesures de poids frais et de surface à l'aide d'un planimètre (LI-COR. inc ; LI-3100 AREA-METER) ou à partir de photographies numériques traitées avec le logiciel AREA (Matlab 7.0). Le rapport de surface massique obtenu par régression linéaire sur les données du sous-échantillon a été appliqué aux valeurs de poids frais de l'ensemble de l'échantillon.

Si l'on mets l'ensemble des couples matière fraîche/surface foliaire sur un graphique, on s'aperçoit que l'on peut déterminer une surface massique fraîche par cépage et par an (Figure 14).

- *Croissance en biomasse*

Les différentes parties de la plante (feuilles, rameaux et grappes) ont été pesées séparément pour obtenir leur poids frais. Ensuite, les échantillons ont été mis dans une étuve pendant une période de 48 heures à 70°C et ils ont été repesés pour obtenir le poids sec.

- *Azote dans la plante*

Une analyse de la teneur en azote de chaque partie de la plante a été réalisée après broyage des organes par la méthode Dumas (NF EN 13654-2).

2.4.3. Etat hydrique du système sol-racines

L'état hydrique des parcelles a été contrôlé par 2 méthodes différentes, selon le site et selon l'organisme : mesure de l'humidité du sol *in situ* avec une sonde à neutrons et/ou des mesures du potentiel foliaire de base au cours du cycle de la plante (surtout durant la période floraison – récolte) (cf. § I.4. pour la technique de mesures).

Ces mesures ont été assurées tout au long des expérimentations par les différents organismes (cf. Tableau 2-Annexe I). Seules les parcelles du réseau situées dans la région de Cognac (Sigogne et Juillac) n'ont pas fait l'objet de mesures d'état hydrique au cours du cycle. Les seuls indicateurs de l'alimentation hydrique de la plante dans ces parcelles sont des mesures de ^{13}C (Van Leeuwen *et al.*, 2001, Gaudillere *et al.*, 2002). Cependant, les analyses de sol étaient suffisamment fiables pour conserver ces parcelles dans notre jeu des données (Fournier, 2004).

2.4.4. Rendement

- *Composantes du rendement*

Le rendement est généralement connu en frais pour la BDH (directement à l'échelle de la parcelle). Il a été mesuré en frais et en sec pour la BDE à l'échelle d'une placette correspondant au même échantillonnage que les mesures biologiques. Le passage au poids sec dans le cadre de la BDH s'est fait en utilisant la relation entre la teneur en sucre (connue) et la teneur en eau des baies (cf. § I.3).

Le poids d'une baie est extrait de la mesure classique effectuée sur 200 baies choisies (voire dans certains cas 1000 baies). Cet échantillonnage n'est pas forcément strictement comparable avec la variable de sortie du modèle, qui correspond au poids moyen d'une baie quelconque.

Le nombre de baies est un calcul résultant du rapport entre le rendement et le poids d'une baie.

- *Teneur en sucre et autres données de qualité*

La teneur en sucre est mesurée par réfractométrie, ce qui permet d'obtenir la TAVP (teneur en alcool volumique probable) par la relation : 16.86 gr de sucre / l = 1°alcool.

D'autres mesures ont été également réalisées : acidité totale, teneur en anthocyanes, azote total et assimilable dans les moûts.

3. Outils statistiques d'optimisation et d'évaluation du modèle

3.1. Optimisation

L'outil utilisé pour le paramétrage par optimisation est un programme fourni avec STICS. Ce programme est codé en C et est basé sur la méthode du simplex (Nelder et Mead, 1965 ; Sorooshian et Gupta, 1993). Cette méthode permet d'optimiser plusieurs paramètres sur une ou plusieurs variables. Le critère optimisé est un critère des moindres carrés pondérés. Il s'écrit de la façon suivante (Makowski *et al.*, 2006) (Équation 12) :

$$\text{Équation 12} \quad C(\theta) = \frac{1}{N \cdot D} \sum_{n=1}^N \sum_{d=1}^D \frac{(Y_{n,d} - f(X; \theta; t_d))^2}{p_n}$$

où $C(\theta)$ détermine la valeur du critère à minimiser pour le jeu de paramètres θ testé ; N est le nombre de variables d'état considérées ; D est le nombre de dates de mesures ; Y_{nd} est la valeur observée à la date d de la variable n ; $f(X; \theta; t_d)$ la valeur simulée à la date d de la variable n pour le jeu de valeurs de paramètres θ ; et p_n le facteur de pondération spécifique de la variable n .

3.2. Evaluation

D'autre part, pour l'évaluation du modèle STICS, il est nécessaire d'utiliser plusieurs critères mathématiques pour quantifier la divergence entre les données observées et celles simulées (Brisson *et al.* 2002). Nous utiliserons les critères statistiques suivants (Brisson *et al.* 2002a, Wallach *et al.*, 2001).

- ❖ la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne ("Root Mean Square Error", RMSE) (Équation 13).

$$\text{Équation 13} \quad RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^I (O_i - S_i)^2}$$

où O_i représente la valeur observée, S_i la valeur simulée et n le nombre d'observations. Ce critère donne beaucoup de poids aux erreurs élevées. La RRMSE est la valeur en relatif (%) de la RMSE qui est calculée en divisant la valeur de la RMSE par la moyenne des valeurs observées.

- ❖ RMSEs (systématique) détermine le biais du modèle. Pour cela, elle mesure l'écart entre la droite de régression (entre simulées et observées) et la première bissectrice (Équation 14).

$$\text{Équation 14} \quad RMSEs = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^I (O_i - P_i)^2}$$

où O_i représente la valeur observée, P_i est la valeur prédite par la régression et n le nombre d'observations.

- ❖ RMSEu (unsystematic) détermine la dispersion du modèle autour de la droite de régression entre valeurs observées et valeurs simulées par le modèle (Équation 15)

$$\text{Équation 15} \quad RMSEu = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^I (S_i - P_i)^2}$$

où S_i est la valeur simulée, P_i est la valeur prédite par la régression et n le nombre d'observations.

- ❖ Le biais moyen (Mean Deviation, MD) (Équation 16)

$$\text{Équation 16} \quad MD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^I (S_i - O_i)$$

où S_i représente la valeur simulée, O_i la valeur observée et n le nombre d'observations. Ce critère donne le même poids à toutes les erreurs, il peut y avoir une compensation entre erreurs positives et négatives. Une MD proche de 0 indique l'absence de biais.

- ❖ L'efficacité du modèle (EF) (Greenwood *et al.*, 1985) est calculée sur la base de la variance du modèle comparée à la variance expérimentale. Celle-ci permet d'estimer la performance du modèle par rapport à la moyenne expérimentale. Si EF est près de zéro, il indique que la valeur moyenne des mesures est plus fiable que la simulation (Équation 17).

Tableau 13 a. Valeurs des parcours de développement pour les différents paramètres qui décrivent la phénologie. **b.** Nous avons calculé la valeur de la somme de températures en base 10°C entre le débourrement et la maturité physiologique (arrêt du cumul de carbone dans les baies).

Module	Paramètres	Grenache	Syrah	Pinot Noir	Chardonnay	Chenin	Cabernet Franc	Ugni Blanc	Merlot
DÉVELOPPEMENT	<i>Q10</i>	2.17							
	<i>IDEBDORM</i> ¹	213	213	213	213	213	213	213	213
	<i>JVC</i> ²	102.2	99.2	103.6	101.2	107.5	66.8	94.3	105.7
	<i>STDORDEBOUR</i> ³	9174.3	7818.6	7468.9	6576.7	9000.0	11548.0	9145.4	7595.5
	<i>STLEVAMF</i> ⁴	25.0							
	<i>STAMFLAX</i> ⁴	1123.3	987.3	941.7	926.6	945.0	973.0	1142.0	999.7
	<i>STLEVDRP</i> ⁴	363.3	371.3	319.2	304.9	310.8	292.4	420	347.7
	<i>STFLODRP</i> ⁴	50.0	65.0	53.0	51.0	41.0	33.0	41.0	50.0
	<i>STDRPNOU</i> ⁴	91	76	88	90	100	100	91	91
	<i>STDRPDES</i> ⁴	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

¹ Jour julien à partir duquel il commence le calcul du cumul d'actions froides du modèle de Bidabe

² Actions Froides calculés selon le modèle de Bidabe (cf.§. I.2)

³ Degrées heure⁻¹ en base 5

⁴ Degrées jour⁻¹ en base 10

13 b. Nous avons calculé la valeur de la somme de températures en base 10°C entre le débourrement et la maturité physiologique (cf.§. I.3).

	Grenache	Syrah	Pinot Noir	Chardonnay	Chenin	Cabernet Franc	Ugni Blanc	Merlot
<i>Somme de températures entre le débourrement et la maturité physiologique (°C.jour base 10)</i>	1926	1685	1696	1675	1649	1762	1872	1715

$$\text{Équation 17} \quad EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^I (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^I (\bar{O}_i - O_i)^2}.$$

où O_i représente la valeur observée, S_i la valeur simulée, \bar{O}_i est la valeur moyenne des observés et n le nombre d'observations.

Ces critères statistiques ont été calculés une fois effectué le paramétrage sur la BDE, pour évaluer les limites du modèle, et sur la BDH, pour déterminer la qualité de la validation du modèle.

4. Paramétrage à partir de la bibliographie, par analogie ou par expérimentation

La signification des paramètres est donnée dans les différents tableaux de l'Annexe III.

4.1. Les températures cardinales de la physiologie de la vigne

Dans le modèle, il existe un certain nombre de températures seuils qui pilotent le fonctionnement de la plante (Tableau 1-Annexe III) : au niveau du développement ($TDMIN$ et $TDMAX$), de la croissance foliaire ($TCMIN$ et $TCMAX$), racinaire ($TGMIN$), de la photosynthèse nette ($TEMIN$, $TOPT$ et $TEMAX$), de la croissance des fruits ($TREMPMIN$ et $TREMPMAX$). Les deux dernières températures sont des extrêmes journaliers alors que les autres sont des moyennes. De plus, pour la phase de post-dormance, deux températures cardinales différentes de $TDMIN$ et $TDMAX$ sont utilisées, $TMINDEB$ et $TMAXDEB$, respectivement égales à 5°C et 25°C, comme il a été démontré dans l'article Chapitre II.2.

Tous les auteurs qui font état de ces températures cardinales s'accordent sur des valeurs identiques, que ce soit pour le développement ou la croissance. Ainsi les températures minimales seront affectées à 10°C (Nigond, 1957 ; Winkler *et al.*, 1962 ; Gutierrez *et al.*, 1985), sauf pour le remplissage des baies ou nous prendrons 0°C comme température minimale journalière. Au sujet des maximales, les valeurs proposées dans la littérature varient entre 35 et 40°C (Kriedemann et Smart, 1971 ; Torokfalby et Kriedemann, 1977 ; Stoev et Slavtcheva, 1982 ; Champagnol, 1984 ; Huglin et Schneider, 1998). Nous avons choisi 37°C, qui fait aussi office de limite du remplissage des baies (Dokoolzian et Bergqvist, 2001). Le seuil optimal de photosynthèse a été fixé à 25°C (Nigond, 1957 ; Buttrose, 1968 ; Alleweldt *et al.*, 1982 ; Stoev et Slavtcheva, 1982).

Les températures du gel seront vues dans la partie 4.1.10 de ce chapitre.

4.2. Développement

Les valeurs des parcours de développement pour les différents paramètres qui décrivent la phénologie dans le modèle ont été considérées dépendantes de la variété (Tableau 13a et Tableau 2-Annexe III)

Figure 15. Description de la croissance du feuillage. Le graphique A présente les différentes composantes normalisées selon les paramètres du modèle PUTU (Singels et Jagger, 1991); le graphique B la même courbe, une fois adapté à la phénologie de la croissance du feuillage du blé; et le graphique C, montre celle de la vigne.

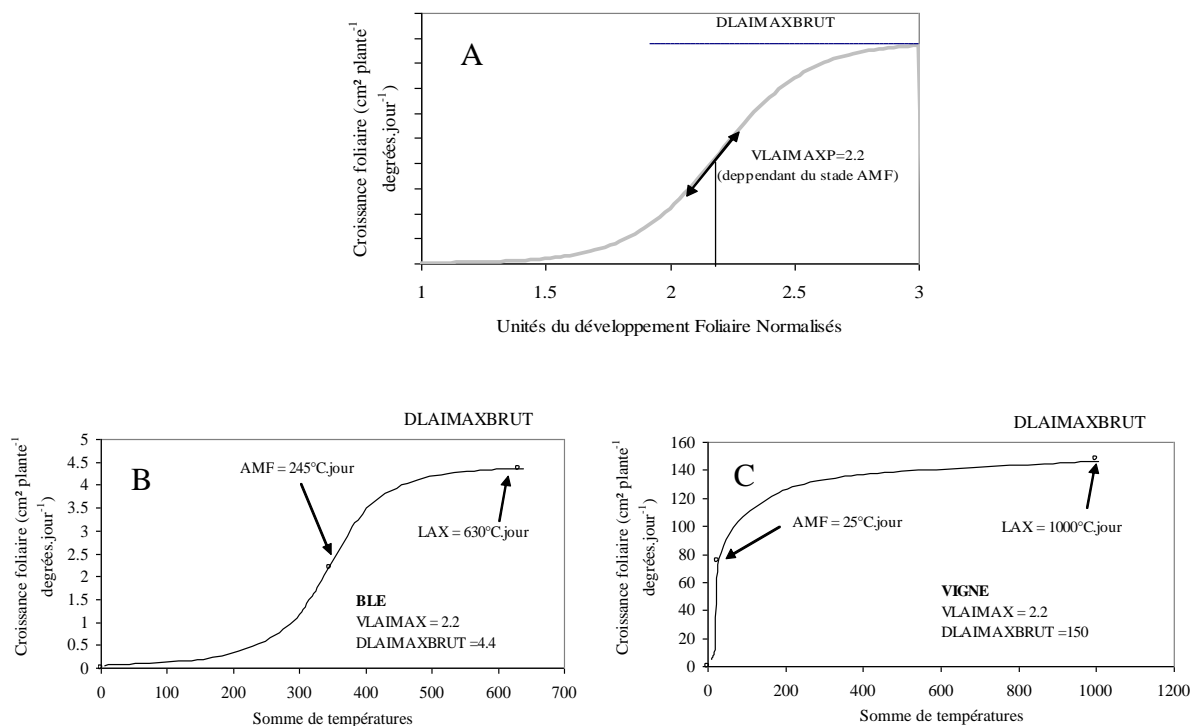


Tableau 14. Valeurs du paramètre *HAUTBASE*. Il dépend du type de taille pratiquée dans la parcelle. Les valeurs montrées dans le tableau sont issues des différentes parcelles utilisées dans la BDE.

Type de Taille	Cordon double	Cordon simple	Guyot Simple		Guyot Double		Chablis
			Angers	Bourgogne	Bordeaux	Cognac	
Hauteur de base (m)	0.6	0.5	0.7	0.3	0.5	0.7	0.3

(données issues de la BDH, de la base de données PHENOCLIM® et du travail de Rivera et Devoto, 2003). Les paramètres *JVC* et *STDORDEBOUR* ont été définis dans le chapitre I.2, ils correspondent aux paramètres C_c , G_{hc} et T_0 , de l'article.

Les autres paramètres du modèle de débourrement indépendants de la variété (cf.§. I.2 où les paramètres sont à la fois définis et affectés) sont le *Q10* (égal à 2.13) et la date d'entrée en dormance (*IDEBDORM* défini au premier août).

D'autre part *Vitis vinifera* L. est considérée comme une plante très peu sensible à la photopériode (Alleweldt, 1957, 1959, 1963a et b, 1964). Dans notre cas le photopériodisme de la plante n'a pas été pris en compte pour le calcul du développement de la plante. Il a été pris en compte seulement pour son impact dans la sénescence des feuilles (cf.§ I.8).

4.3. Feuillage

4.3.1. Paramètres qui définissent la croissance

La composante phénologique de la croissance foliaire est basée sur celle décrite dans le modèle PUTU (Singels et Jagger, 1991). Cette croissance est calculée selon une logistique entre les stades LEV et LAX, avec un point d'inflexion au niveau du stade AMF, défini comme l'accélération maximale de la croissance foliaire. La normalisation des abscisses nous permet d'utiliser des valeurs génériques pour les paramètres de forme de la courbe ($VLA_{MAX} = 2.2$ et $PENTL_{MAX} = 5$ sont celles du modèle initial de Singels et Jagger, 1991). La Figure 15 montre que la spécificité des plantes repose sur leur calendrier phénologique et sur la valeur de l'asymptote, $DLA_{MAXBRUT}$ en $m^2/plante/°C.jour$, qui sera obtenue par optimisation. La valeur de 3 pour le paramètre de UDL_{MAX} est générique pour les cultures indéterminées. Elle signifie que le ralentissement de la croissance foliaire après l'installation du feuillage n'est pas sous déterminisme phénologique, mais plutôt géré par la compétition feuille-fruit (Tableau 3-Annexe III).

D'autre part, comme nous l'avons décidé dans le chapitre II.5, nous n'allons pas prendre en compte les possibles effets de concurrence en fonction des différentes densités de plantation (Perotto, 2005) (*ADENS* égal à 0).

A titre indicatif, le modèle calcule un nombre de feuilles mises en place sur un même rameau à partir d'un phyllotherme pris égal à $25°C.jour$ (Castellan-Estrada, 2001 ; Louarn, 2005).

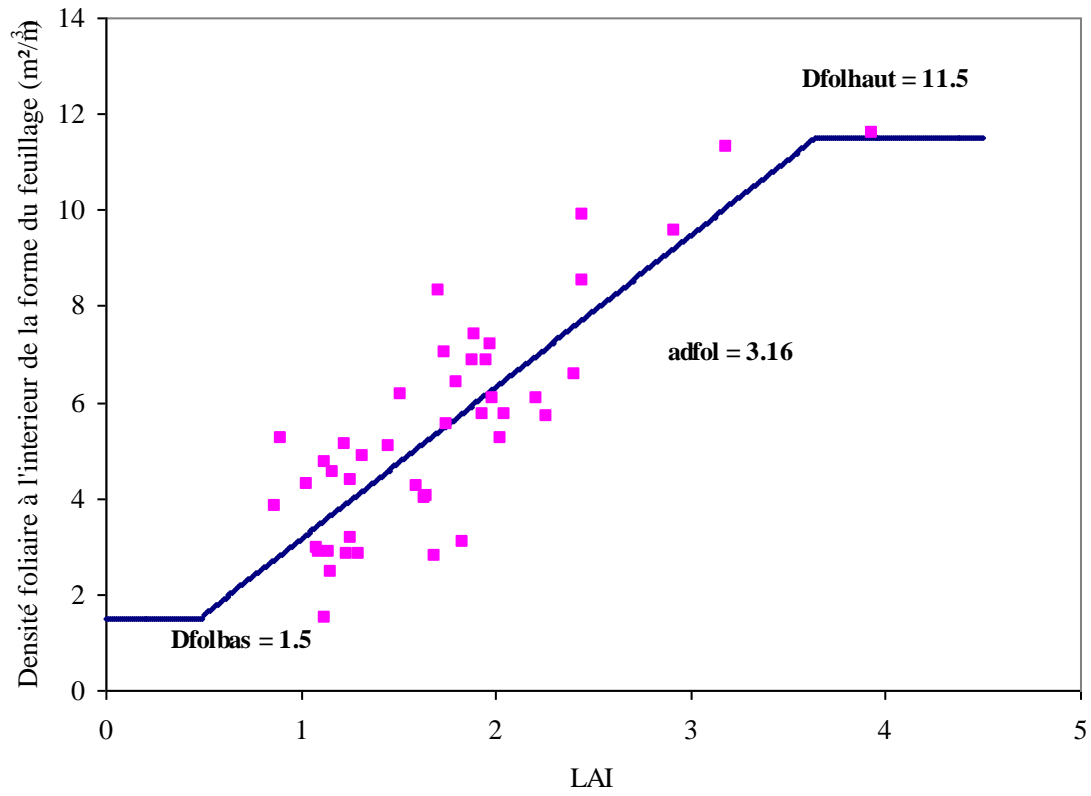
4.3.2. Paramètres qui définissent la structure

La structure du feuillage est définie par la hauteur de la base du feuillage (paramètre *HAUTBASE*) et la hauteur maximale du feuillage (paramètre *HAUTMAX*). Ce dernier paramètre, n'est plus actif. Il a été remplacé par un paramètre technique défini par le palissage (*HAUTMAXTEC*). Par ailleurs, la hauteur de la base du feuillage est fonction du type de taille (Tableau 14).

4.3.3. Paramètres qui définissent le stress appliqué au feuillage

L'impact des stress hydrique et azoté s'exerce en priorité sur la croissance, puis sur la sénescence. Le gel (cf 4.10) ne joue que sur la sénescence. Cette priorité est déterminée par les paramètres

Figure 16. Relation entre la densité foliaire et le LAI. Les données sont issues de la BDE et l'estimation des paramètres *ADFOL*, *DFOLBAS*, *DFOLHAUT* s'est faite à partir de cette relation.



INNTURGMIN et *INNSEN* pour le stress azoté et *PSITURG* (cf.§ II.4.11.1) et *RAPSENTURG* pour le stress hydrique. L'impact du stress azoté sur l'expansion foliaire est supposé identique à l'impact sur la photosynthèse ($INNTURGMIN = INNMIN = 0.3$) (Brisson *et al.*, 2002). Les paramètres *INNSEN*, *RAPSENTURG* seront calculés par optimisation (Tableau 3-Annexe III).

4.3.4. Paramètres qui définissent la sénescence

La durée de vie d'une unité de surface de feuille (en cm²) (paramètre *DURVIEF*) a été considérée comme spécifique de l'espèce, et indépendante de l'âge de la feuille ($RATIODURVIEI = 1$). Elle est estimée à 400 unités "Q10", soit 2000°C.jour (avec une température base égale à 10°C). Mais comme nous l'avons expliqué dans le chapitre II.8, ce paramètre a peu de poids avec l'introduction de l'impact de la photopériode (paramètres $PHOBASE = 12$ heures, $STRPHOTMINSEN = 0.15$, $DLTAMSMAXSEN = 0.01$, $ALPHAPHOT = 200$) (Tableau 3-Annexe III).

Dans le modèle, on peut considérer qu'il existe une partie de la biomasse sénescente remobilisable. Ainsi la biomasse sénescente n'est qu'une proportion (*RATIOSEN*) de la biomasse mise en place qui a été estimée égale à 0.8 (Lecocq, 2002 ; Wermenlinger *et al.*, 1991).

Le modèle prend en compte l'abscission des feuilles une fois qu'elles sont mortes (paramètre *ABSCISSION*), afin de permettre leur recyclage dans le bilan carboné et azoté du sol. Dans notre cas, il a été considéré égal à 1, ce qui signifie que toutes les feuilles mortes, tombent.

4.4. Interception du rayonnement

4.4.1. Paramètres qui définissent la structure de la densité foliaire

La densité foliaire dans la structure du feuillage s'appelle DFOL. C'est le rapport entre la surface des feuilles et le volume de la forme choisie, ce qui ne correspond pas à la définition classique de la densité foliaire en surface des feuilles par m³. Cette densité peut varier entre deux limites nouvellement introduites (*DFOLBAS* et *DFOLHAUT*) en fonction du feuillage produit (LAI total) selon une pente *ADFOL* (Tableau 4-Annexe III).

Pour calculer ces paramètres, nous avons utilisé des données de la BDE. La Figure 16 montre une relation assez stable entre LAI et DFOL, représentant une densification du feuillage. La valeur des trois paramètres *ADFOL*, *DFOLBAS* et *DFOLHAUT* est respectivement de 3.16 ($r^2=0.70$), 1.5 et 11.5.

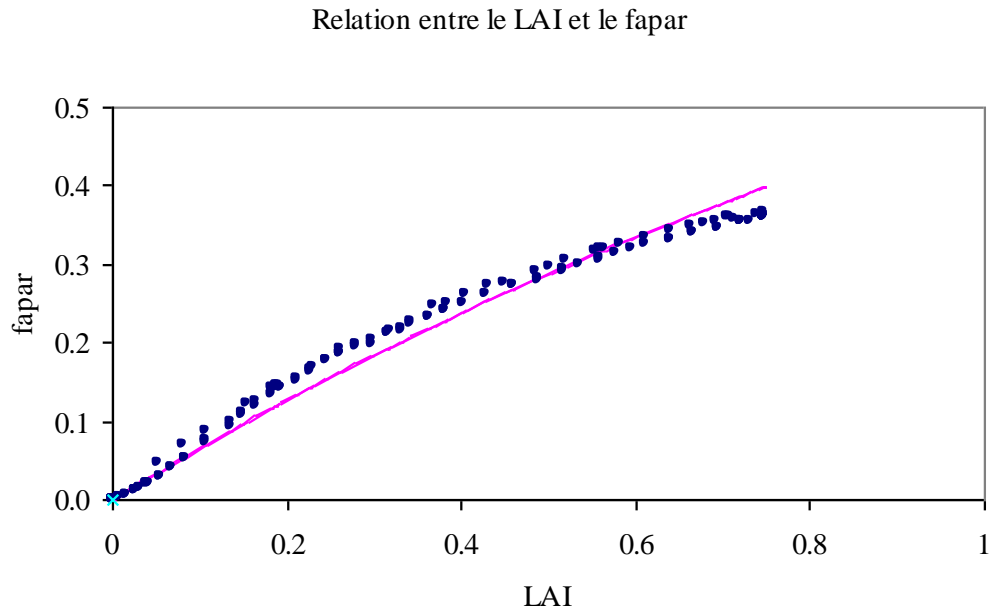
Cette relation va permettre de calculer largeur et hauteur de la forme qui décrit la distribution de la densité foliaire (par le rapport hauteur/largeur : *RAPFORME* = 1.5) à partir de l'équation suivante valable pour la forme triangle choisie (cf.§ I.5.) (Équation 18) :

Équation 18

$$\text{LARGEUR} = \sqrt{\frac{2 \times \text{LAI} \times \text{IR}}{\text{DFOL} \times \text{RAPFORME}}} \text{ et } \text{HAUTEUR} = \text{LARGEUR} \times \text{RAPFORME}$$

où *IR* est la valeur de l'inter-rang.

Figure 17. Représentation graphique des couples de variables LAI – FAPAR, simulées par le modèle en utilisant $K_{TROU} = 1.7$ (points en bleu); et par le calcul de la loi de Beer (équation 19) en utilisant le LAI simulé par le modèle et le $K_s=0.68$ mesuré par Sene (1994) (en rose). Les simulations ont été réalisées selon la même structure de plantation que celle utilisé par Sene (1994).



4.4.2. Coefficient d'extinction du PAR

Le coefficient d'extinction du PAR a travers le feuillage du cep (*KTROU*), a été estimé à partir d'une expérimentation par simulation. Pour cela, le travail de Sene (1994) a été utilisé comme référence. Cet auteur a obtenu une valeur de 0.68 pour le coefficient d'extinction du rayonnement par le couvert végétale (représenté par le LAI) (K_s) quand la plante est en pleine croissance en utilisant la loi de Beer (Équation 19). Pour obtenir la valeur de *KTROU*, plusieurs valeurs ont été testées [0.6 - 2] afin d'obtenir des couples de variables LAI et FAPAR (proportion du rayonnement intercepté), permettant d'estimer un coefficient d'extinction proche de celui de Sene (1994). Nous avons considéré la même structure de plantation que dans le travail de Sene (1994) : une structure de port libre verticale, à faible densité de plantation.

Équation 19
$$f_{apar} = 1 - e^{(-K_s * LAI)}$$

La valeur résultante de *KTROU* est de 1.7 (Figure 17).

4.5. Croissance en biomasse

Trois paramètres définissent l'efficacité de croissance maximale de la plante à différents moments du cycle de la plante (Tableau 5-Annexe III) :

- ❖ Une efficacité de croissance qui agit pendant la phase juvénile de la plante (entre les stades LEV et AMF) (paramètre *EFCROIJUV*). Elle a été fixée à la valeur 1.2g/MJ. Elle n'a cependant pas beaucoup d'impact car cette période est très courte (25°C.jour⁻¹).
- ❖ Une efficacité de croissance qui agit pendant la phase purement végétative (entre les stades AMF et DRP) (paramètre *EFCROIVEG*). Sa valeur va être estimée par optimisation.
- ❖ Une efficacité de croissance qui agit pendant la phase de reproduction, jusqu'à la sénescence totale des feuilles (du stade DRP jusqu'à LAN) (paramètre *EFCROIREPRO*). Sa valeur sera aussi estimée par optimisation.

Le modèle tient également compte de la proportion des réserves remobilisables chaque jour (paramètre *REMOBRES*). Sa valeur sera obtenue par optimisation.

4.6. Répartition entre organes

La répartition de la biomasse entre les organes est dédiée uniquement au dimensionnement du compartiment des réserves. Les paramètres utiles à cette répartition définissent le dimensionnement des organes (Tableau 6-Annexe III).

Les limites haute et basse de la surface spécifique foliaire (SLA) jouent également dans le calcul de la force des puits des feuilles et de la limitation d'expansion foliaire. Le paramètre *SLAMAX* correspond à la valeur structurale du SLA, tandis que le paramètre *SLAMIN* comprend aussi du non structural et correspond à un état de stress extrême. La valeur de *SLAMIN* a été fixée à 100 cm².g⁻¹, obtenue à partir de la valeur minimale observée avec les valeurs de la BDE. La valeur de *SLAMAX* a été calculée par optimisation.

Figure 18. Graphique qui représente le rapport de la matière sèche des rameaux par rapport celle des feuilles (valeur du paramètre *TIGEFEUILLE*).

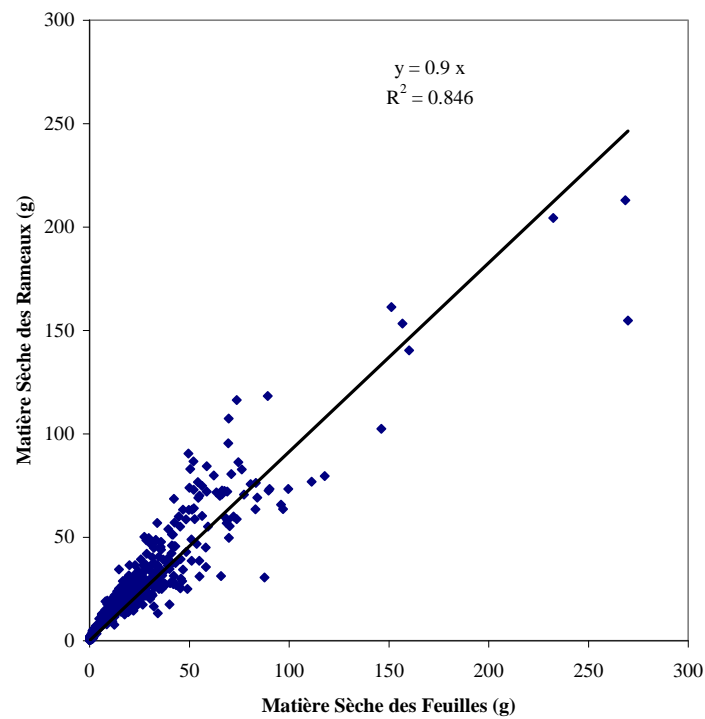
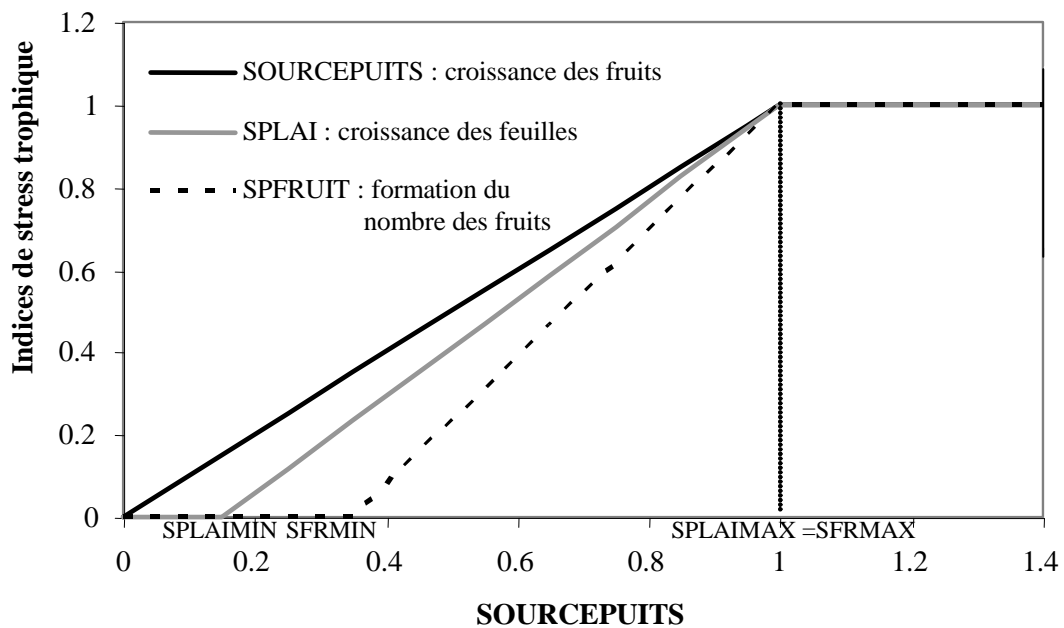


Figure 19. Indices de stress trophique (SPLAI, SPFRUIT) en fonction du rapport source-puits.



Comme la vigne est une dicotylédone, le modèle fait l'hypothèse que le rapport tiges (rameaux)/feuilles est constant au cours du cycle (dans le cas des plantes monocotylédones, la priorité est portée sur les feuilles) (Brisson *et al.*, 2002c). Le rapport tige sur feuille (*TIGEFUILL*) a été obtenu à partir de données de la BDE en faisant l'hypothèse que les tiges contiennent essentiellement des matières structurales. La valeur obtenue, égale à 0.9 (Figure 18), a été considérée constante pour l'ensemble des cépages contrairement à Gutierrez *et al.*, (1985).

L'apport des baies à la photosynthèse globale de la plante a été négligé ($SEA=0$). Pandey et Farmahan (1977) démontrent la présence de photosynthèse dans la baie, mais celle-ci représente seulement 3% de la photosynthèse des feuilles. Lebon *et al.*, (2005) montrent dans les cépages Pinot noir et Gewurztraminer l'influence des inflorescences sur le bilan total de photosynthèse nette, mais en même temps la difficulté d'évaluer leur impact précisément.

Il n'a pas été tenu compte du poids des rafles, séparément des fruits : $ENVFRUIT = 0$.

4.7. Compétition feuille-fruit (source-puits)

La concurrence feuille-fruit est gérée dans le modèle par deux indices de stress trophiques, calculés en fonction du rapport sources-uits et agissant sur le LAI et les fruits séparément : *SPLAI* et *SPFRUIT*. Ces différents indices de stress trophiques ne peuvent pas être considérés équivalents à des priorités d'allocation d'assimilats car ils ne sont pas appliqués seulement à la biomasse.

Les paramètres définissant les relations (Figure 19) sont fixés à 1 pour les seuils maximaux (*SPLAIMAX* et *SPFRMAX*), définissant l'absence de contrainte trophique, pour une valeur source-uits égale à 1. Les seuils minimaux seront déterminés par optimisation (*SPLAIMIN* et *SPFRMIN*) (Tableau 7-Annexe III).

4.8. Calcul du rendement

4.8.1. Paramètres qui définissent les composantes du rendement

Le calcul du rendement dans le modèle STICS peut être décomposé en :

Rendement = Nombre d'Inflorescences/cep x Nombre de baies/inflorescence x Poids d'une baie

Dans le modèle le nombre de grappes maximal est imposé (*NBINFLO*), puis rectifié par éclaircissage. Comme nous l'avons déjà dit, ce paramètre dépend de la variété (fertilité des bourgeons), et du type de taille (nombre de bourgeons laissés à la taille – fertilité). La BDH nous a permis de construire un tableau de ces valeurs maximales (Tableau 15).

Pour calculer le nombre de baies par grappe, le modèle calcule un nombre maximal de fruits noués par inflorescence et par °C.jour⁻¹ (paramètre *AFRUITPOT*). Ce paramètre est considéré variétal et son calcul sera fait par optimisation.

Le poids d'une baie résulte de sa dynamique de croissance (cf. ci-dessous). Il est piloté par le paramètre *PGRAINMAXI*. Dans le cas de cultures indéterminées, ce paramètre ne définit pas le poids maximal d'un grain (0% d'eau), mais la force de puits des baies pour atteindre leur poids final sans aucune contrainte. Ce paramètre a été aussi considéré de type variétal et sa valeur a été obtenue par optimisation (Tableau 8-Annexe III).

Tableau 15. Nombre maximal de grappes calculé à partir des données de la BDH, par cépage et en fonction de la région.

Cépage	Grenache	Syrah	Pinot Noir		Merlot	
Site	CRM et Languedoc	CRM et Languedoc	Bourgogne	Champagne	Bordeaux	
Conduite	Cordon Royat	Cordon Royat	Guyot Double	Cordon Simple	Chablis	Guyot Double
Nombre Maximal des grappes (NBINFLO)	15	20	13	21	21	14

Cépage	Chenin	Cabernet Franc	Chardonnay		Ugni Blanc	
Site	Val de Loire	Val de Loire	Bourgogne	Champagne	Cognac	
Conduite	Guyot Simple	Guyot Simple	Guyot Double	Cordon Simple	Chablis	Guyot Double
Nombre Maximal des grappes (NBINFLO)	15	18	13	22	22	28

Tableau 16. Valeur du paramètre *DUREEFRUIT* pour les différents cépages, calculé à partir des résultats montrés sur la maturité du raisin (cf.§.I.3). Les valeurs sont comparées à la classification des époques de maturité (Galet, 1991).

Cépage	<i>DUREEFRUIT</i> (°C.jour)	Epoques Maturité
Grenache	1472	3eme époque
Syrah	1238	2eme époque
Pinot Noir	1289	1ère époque
Merlot	1276	2eme époque
Chenin	1238	2eme époque
Cabernet Franc	1370	2eme époque
Chardonnay	1280	1ère époque Tardive
Ugni Blanc	1361	3eme époque Tardive

4.8.2. Paramètres qui définissent la croissance d'une baie

Dans le modèle STICS, la croissance des fruits repose sur la définition d'un nombre de classe d'âge (*NBOITE*) que nous avons évalué à 10, ce qui correspond environ à une durée de séjour dans chaque classe de 150°C.jour. Nous avons supposé que la force d'appel des fruits est telle que les assimilats produits peuvent tous être alloués aux fruits, si la demande l'exige (*ALLOCMAX* =1).

Le paramètre *DUREEFRUIT* est défini comme la durée de la croissance d'un fruit depuis la nouaison jusqu'à la maturité (°C.j). Dans notre cas, nous avons établi ce paramètre pour chaque variété. Pour obtenir sa valeur, on a fait l'hypothèse que la maturité est atteinte à 80% du temps normalisé (Chapitre II), c'est-à-dire quand la baie arrive à son poids maximal (Tableau 16). Les valeurs obtenues sont comparées avec la classification traditionnelle des époques de maturité du raisin. Les résultats ne montrent pas une liaison directe entre ces deux classifications, même si le Grenache et l'Ugni Blanc qui ont le cycle le plus long, sont aussi bien classés comme des variétés à maturité de troisième époque.

La "force des puits des fruits" est calculée à partir de la dérivée de la courbe qui décrit la croissance des baies (cf.§. I.3). Les paramètres qui définissent la courbe normalisée (en fonction du poids maximal du fruit et de leur développement) ont été calculés à partir des mesures de l'expérimentation sur la maturité du raisin. Comme nous l'avons décrit dans le Chapitre II, la croissance des baies normalisée suit une double sigmoïde qui a été décomposée en deux courbes : une exponentielle qui décrit la multiplication cellulaire dans la baie, et une logistique qui décrit le grandissement des cellules. Les paramètres qui décrivent cette dynamique sont considérés indépendants de la variété : *AFPF*, qui représente le point d'inflexion de la logistique, a été fixé égal à 0.65 (dans l'axe des abscisses qui représente le développement) ; *BFPF*, qui représente la courbure de la logistique, a été fixé égal à 18 ; *CFPF*, qui représente la courbure de l'exponentielle, a été fixé égal à 15 ; et *DFPF*, qui représente le point d'inflexion de l'exponentielle, est égal à 0.2 (dans l'axe des abscisses qui représente le développement) (Figure 7 Article Maturité). Les paramètres *AFPF*, *BFPF*, *CFPF* et *DFPF*, correspondent respectivement aux paramètres L_c , L_{mg} , E_c et E_{mg} montrés dans le chapitre II. La différence entre la valeur de *AFPF* et L_c est expliquée par le fait que dans le modèle, le calcul de la croissance des fruits est déterminé à partir de la nouaison (stade *DRP* du modèle) et dans l'article, elle est calculée à partir de la floraison (Tableau 8-Annexe III).

4.8.3. Paramètres qui définissent la dynamique de l'eau dans les fruits

La teneur en eau des fruits n'est pas considérée constante. Son évolution a été décrite dans le chapitre I.3. Cette évolution est contrôlée par trois facteurs (Tableau 8-Annexe III) :

- ❖ la teneur en eau initiale du fruit (*H2OFRVERT*), égale à 0.925 g eau. g⁻¹ de matière fraîche, calculée à partir des données mesurées dans l'expérimentation sur la maturité du raisin (cf. §. I.3).
- ❖ la vitesse d'évolution de la teneur en eau des fruits (%/jour) (paramètre *DESHYDBASE*). Cette valeur a été considérée dépendante de la variété, car elle est la composante phénologique de la dynamique d'évolution de la teneur en eau. Sa valeur sera calculée par optimisation en fonction de la variété.

- ❖ l'accélération de la diminution de la teneur en eau (*TEMPDESHYD*), induite par l'augmentation de la différence entre la température de culture et la température de l'air. La valeur de ce paramètre a été optimisée pour l'espèce.

4.8.4. Paramètres qui définissent la teneur en sucre et en azote des fruits

La valeur de la teneur en sucre est calculée en faisant l'hypothèse que la proportion de sucre par rapport à la matière sèche augmente de façon constante de la nouaison à la maturité (*VITPROPSUCRE* qui est égal à $0.0029 \text{ g de sucre g MS}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C.jour}^{-1}$). Cette dynamique n'est pas forcément réaliste, c'est pourquoi elle a été calculée à la récolte.

La quantité d'azote présente dans les fruits est une proportion croissante de la quantité d'azote de la biomasse (*VITIRAZO* en $\text{g N fruit g MS plante}^{-1} \text{ jour}^{-1}$). Sa valeur est considérée comme dépendante de l'espèce et elle sera calculée par optimisation (Tableau 8-Annexe III).

4.9. Racines

4.9.1. Le développement racinaire calqué sur le développement foliaire

Le développement des racines est déterminé entre les stades *LEV* (le débourrement) et *LAX* (stade auquel le LAI est maximal), l'arrêt de croissance foliaire déterminant l'arrêt de croissance racinaire en accord avec la bibliographie (Litvinov, 1971 ; Freeman et Smart, 1976 ; Van Zyl, 1983 cité par Champagnol, 1984 ; Murisier, 1996). Cependant, ces auteurs ont montré aussi une reprise de la croissance racinaire dans les mois de septembre et octobre. Cette reprise, très faible et difficile à modéliser, n'a pas été prise en compte dans le modèle (Tableau 9-Annexe III).

4.9.2. Paramètres qui gèrent la croissance en densité

La profondeur racinaire est supposée fixée lors de l'initialisation : les racines peuvent juste croître en densité. En conséquence les paramètres *CROIRAC* et *LVFRONT* n'ont pas été affectés. La croissance en densité des racines est définie par une vitesse de production des racines et une durée de vie. La vitesse maximale de production de longueur racinaire par plante (*DRACLONG* en $\text{cm racine plante}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C.jour}^{-1}$) a été estimée à $40 \text{ cm racine plante}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C.jour}^{-1}$, à partir des données issues des travaux de Litvinov (1971), Ionescu (1978a et b) et García de Lujan et Gil (1982) cités par Champagnol (1984). Conformément aux hypothèses sur l'arrêt de croissance racinaire, la valeur en somme de degrés jours de la durée de vie d'une racine ($2000 \text{ }^{\circ}\text{C.jours}$) (paramètre *DEBSENRAC*) est égale à celle de la feuille.

La longueur spécifique des petites racines (non pas les racines structurales) (*LONGSPERAC*), est utile pour la conversion en biomasse et le recyclage dans le sol. Selon Champagnol (1984), la longueur des racines dans 1m^3 de terre peut atteindre les 200m ainsi que un poids voisin de 1250 g, ce qui permet de calculer une longueur de 16 cm de racine /g de racine fraîche. Castelan-Estrada (2001) montre que les racines fines ($<0.5\text{mm}$) représentent 13% de la masse racinaire mais 82% de la longueur développée. Si l'on combine les deux informations, nous avons une valeur finale (avec un taux d'humidité proche de 90%) de 1021 m de racines / g de racine sèche.

L'anoxie racinaire est aussi un élément pris en compte dans le modèle (paramètre *SENSANOX*). Celui-ci peut varier entre 0 (pas d'effet) et 1 (effet critique). Dans notre cas, et en fonction des sols de

Tableau 17. Valeurs du pourcentage de biomasse sèche dans la biomasse fraîche pour différentes parties de la plante, pour tous les cépages, aux différents stades (données BDE).

	% de Matière sèche dans la biomasse fraîche					
	5 feuilles			floraison		
	Rameaux	Feuilles	Grappes	Rameaux	Feuilles	Grappes
Moyenne	0.12	0.19	0.13	0.20	0.24	0.15
Écart-type	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03
Coeff. Variance	9.75	8.93	26.40	10.70	9.91	22.83

	Véraison			récolte		
	Rameaux	Feuilles	Grappes	Rameaux	Feuilles	Grappes
	Moyenne	0.37	0.28	0.16	0.42	0.31
Écart-type	0.06	0.03	0.03	0.06	0.05	0.04
Coeff. Variance	16.53	11.69	19.69	14.31	16.20	16.93

	% d'eau dans la biomasse fraîche					
	5 feuilles			Floraison		
	Rameaux	Feuilles	Grappes	Rameaux	Feuilles	Grappes
Moyenne	0.88	0.81	0.87	0.80	0.76	0.85

	Véraison			Récolte		
	Rameaux	Feuilles	Grappes	Rameaux	Feuilles	Grappes
	Moyenne	0.63	0.72	0.84	0.58	0.69

	Rameaux	Feuilles Vertes	Feuilles Jaunes	Fruit vert
Valeur STICS	0.70	0.75	0.5	0.925
Origine de la donnée	BDE	BDE	BDE	Exp. Maturité Chapitre II

notre étude, nous avons décidé de ne pas prendre en compte un possible effet d'anoxie. Cependant, celle-ci pourrait être intéressante à utiliser comme paramètre qui diffère en fonction du porte-greffe utilisé.

4.10. Gel

Le modèle STICS permet d'estimer les dégâts du gel à partir d'une série d'indices. Ces indices sont déterminés par deux paramètres qui vont avoir un impact à n'importe quel moment du cycle de développement de la plante (*TLETALE* et *TDEBGEL*) et deux paramètres dépendant du stade de développement (*TGEL_10* et *TGEL_90* sont les températures à laquelle on observe des dégâts de 10 et 90% respectivement). La température létale (*TLETALE*) pour la plante a été fixée à -20°C (Winkler *et al.*, 1962). La température de début d'action du gel (*TDEBGEL*) est considérée comme étant de -1.5°C (Bouchet, 1962 cité par Champagnol, 1984). Les deux autres indices sont décrits séparément selon leur impact sur les feuilles dans la phase juvénile (entre LEV et AMF) ou la phase végétative adulte (à partir de AMF). D'autre part, ces deux indices sont aussi appliqués à partir du stade FLO pour le gel des fleurs et des fruits. Dans tous les cas, la valeur de *TGEL_10* est égale à -2°C , et la valeur de *TGEL_90* est égale à -5°C (Bouchet, 1962 cité par Champagnol, 1984) (Tableau 10-Annexe III).

4.11. Eau dans la plante

4.11.1. Potentiels critiques et résistance stomatique

Pour calculer les stress hydriques et leurs effets sur la croissance de la plante, le modèle utilise d'une part le potentiel critique de fermeture stomatique (*PSISTO*) et d'autre part le modèle de contrôle de l'expansion cellulaire à partir d'un potentiel critique (aussi appelé potentiel de turgescence, *PSITURG*) (Tableau 11-Annexe III).

PSISTO a un effet direct sur le calcul de la transpiration de la plante. Il intervient dans le calcul du seuil de teneur en eau du sol disponible pour la plante, séparant la phase de transpiration maximale de la phase de transpiration réduite selon le formalisme décrit dans Brisson (1998, 2002c). Sa valeur a été établie à 15 bars (Kriedemann et Smart ; 1971 ; Winkel et Rambal, 1990). Cependant, il est possible que cette valeur puisse avoir un caractère variétal que nous ne prendrons pas en compte (Winkel et Rambal, 1990 ; Bota *et al.*, 2001 ; Medrano *et al.*, 2005).

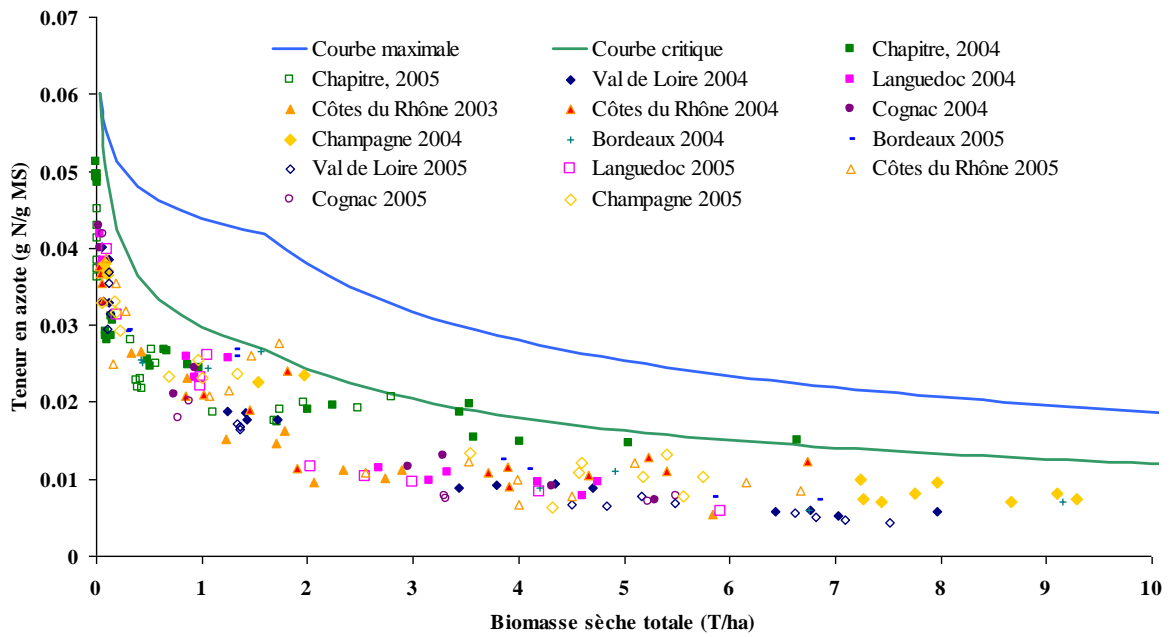
PSITURG est égal à 6 bars (Pellegrino, 2003 ; Pellegrino *et al.*, 2004 ; Lebon *et al.*, 2005 ; Lebon *et al.*, 2006).

Les calculs des besoins en eau reposent sur une résistance stomatique minimale (*RSMIN*), que nous considérons comme indépendant de la variété. Sa valeur ne peut pas être déduite des valeurs instantanées mesurées au poromètre, ce qui a rendu nécessaire son optimisation (Brisson *et al.*, 2002c).

4.11.2. Teneur en eau dans les différents organes.

Le modèle considère que la teneur en eau des feuilles admet deux valeurs : une valeur feuille verte (*H2OFEUILVERTE*) et une valeur feuille jaune (*H2OFEUILJAUNE*) ; elle est supposée constante pour les tiges (*H2OTIGESTRUC*). Les travaux de Wermelinger *et al.*, (1991) et Wermelinger et

Figure 20. Ajustement des courbes caractéristiques du fonctionnement azoté de la vigne à partir des données expérimentales au Domaine du Chapitre (Célette, 2004, 2005) et de la BDE (Garcia de Cortázar, 2004, 2005).



Koblet, (1990) montrent que pour les feuilles cette évolution peut être plus progressive. Dans nos expérimentations (Tableau 17), l'évolution pour les feuilles vertes est de 10%, quasi nulle pour les feuilles jaunes et de 30% pour les rameaux. Les valeurs retenues sont de moyennes ; il faut savoir que ce calcul est indicatif et n'a pas d'effet dans le modèle (Tableau 11-Annexe III).

Rappelons que la teneur en eau des fruits a été décrite dans le chapitre III § 4.8.3.

4.12. Azote dans la plante

4.12.1. Paramètres de courbes de dilution et stress azoté

Pour obtenir les valeurs des paramètres de courbes de dilution (chapitre I.7), les données de différents sites expérimentaux ont été utilisées : Languedoc, Côtes du Rhône, Champagne, Cognac, Val de Loire et Bordeaux (données BDE et Celette et al., 2006). Ces données correspondent à des états contrastés d'alimentation azotée (vigne enherbée ou non, fertilisée ou non, irriguée/non-irriguée). Les données correspondent aussi à différents cépages (*Vitis vinifera* L. cv Aranel, Grenache, Syrah, Chenin, Cabernet Franc, Ugni Blanc, Merlot, Pinot Noir et Chardonnay). L'hypothèse que le comportement azoté de la vigne n'a pas un caractère variétal est proposée. Les valeurs minimales et maximales des teneurs obtenues dans ces expérimentations concordent avec celles issues de la bibliographie (Tableau 7). Les quantités d'azote exportées par la plante varient entre 20 et 80 kg N ha⁻¹ an⁻¹ ce qui correspond bien aux données de la bibliographie montrées auparavant. Le jeu de paramètres $NMETA = 6\%$ MS et $NRES = 1.5\%$ MS est issu du travail de Zapata (1998) et Wermelinger *et al.*, (1991). La valeur de $MASECMETA$ (0.04) est un seuil indépendant de la plante. Pour le paramètre $BDIL$ nous avons utilisé la valeur classique des plantes en C3 (0.44). En faisant l'hypothèse que les points « bien alimentés », en azote sont sur la courbe critique et que l'on a jamais de véritable consommation de luxe dans nos expérimentations, les valeurs de $ADIL$ et $MASECDIL$ sont obtenues par ajustement non-linéaire sur les points les plus élevés (Figure 20). Puisque les points sont représentatif de l'ensemble du cycle de la vigne, nous faisons l'hypothèse qu'il n'y a pas lieu de modifier la demande en azote de la plante, telle que décrite par ces courbes, quand les fruits sont présents ($INNGRAIN1=INNGRAIN2=1$).

Par ailleurs, la valeur de $INNIMIN$ va être estimée par optimisation (Tableau 12-Annexe III).

4.12.2. Paramètres de l'absorption de l'azote

L'offre en azote du sol est contrôlée par le transfert de nitrates dans le sol et par l'absorption active de la plante. Cette dernière est faite en fonction de la densité racinaire, de la capacité de la plante à absorber des nitrates et de la concentration en nitrates. L'absorption de nitrates augmente avec la concentration de nitrates selon une double cinétique de Michaëlis-Menten qui décrit deux systèmes de transport : un système à forte affinité ($VMAX1$ et $KM1$ faibles) et un système à faible affinité ($VMAX2$ et $KM2$ élevés) (Brisson *et al.*, 1998a). Ces paramètres auraient dû être estimés à partir des données de la BDE. Cependant, pour ne pas saturer la liste des paramètres à optimiser, seulement $VMAX2$ a été estimé par optimisation (Brisson et al., 2002a). Les autres paramètres ont été affectés par analogie avec les autres plantes déjà paramétrées dans le modèle : $VMAX1$ (0.0018 $\mu\text{mol. cm}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$), $KM1$ (50 $\mu\text{mol. cm de racine}^{-1}$) et $KM2$ (25000 $\mu\text{mol. cm de racine}^{-1}$) (Tableau 12-Annexe III).

Tableau 18. Liste des paramètres à optimiser, en fonction du module auquel ils appartiennent, de la variable qu'ils contrôlent, et de leur caractère variétal ou spécifique.

Module	Paramètre	Espèce / variété	Variable
FEUILLAGE	<i>DLAIMAXBRUT</i>	Espèce	LAI
	<i>INNSENES</i>	Espèce	LAI
	<i>RAPSENTURG</i>	Espèce	LAI
CROISSANCE EN BIOMASSE	<i>EFCROIVEG</i>	Espèce	Biomasse Totale sèche (t/ha)
	<i>EFCROIREPRO</i>	Espèce	Biomasse Totale sèche (t/ha)
	<i>REMOBRES</i>	Espèce	Biomasse Totale sèche (t/ha)
REPARTITION	<i>SLAMAX</i>	Espèce	LAI
COMPETITION	<i>SPFRMIN</i>	Espèce	LAI / Nombre des Fruits (Fruits/m ²)
	<i>SPLAIMIN</i>	Espèce	LAI / Nombre des Fruits (Fruits/m ²)
RENDEMENT	<i>AFRUITPOT</i>	Variété	Nombre de fruits (Fruits/m ²)
	<i>PGRAINMAXI</i>	Variété	Biomasse sèche des fruits (t/ha)
	<i>VITIRAZO</i>	Espèce	Quantité d'azote dans les fruits (kg/ha)
EAU	<i>DESHYDBASE</i>	Variété	Teneur en eau (%)
	<i>TEMPDESHYD</i>	Espèce	Teneur en eau (%)
	<i>RSMIN</i>	Espèce	LAI
AZOTE	<i>VMAX2</i>	Espèce	Quantité totale d'azote dans la plante (kg/ha)
	<i>INNIMIN</i>	Espèce	Quantité totale d'azote dans la plante (kg/ha)

5. Paramétrage par optimisation

5.1. Méthode d'optimisation utilisée dans notre étude

Plusieurs paramètres ont été décrits dans la partie précédente, dont le calcul nécessite l'utilisation d'une méthode d'optimisation. Le choix des paramètres qui ont été optimisés s'est fait à partir de l'analyse de sensibilité de STICS réalisée par Ruget *et al.*, (2002), et tenant compte des particularités de la vigne qui n'avaient pas été prises en compte dans le travail mentionné ci-dessus. Le **Tableau 18** liste les paramètres concernés, ainsi que les "modules" dans lesquels ils interviennent et les variables de sortie qu'ils contrôlent et à partir desquelles ils vont être ajustés.

La méthode d'optimisation utilisée, est la méthode d'estimation séquentielle par module (Houlès, 2004 ; Makowski *et al.*, 2006). Cette méthode procède par des optimisations successives de groupes de paramètres : tandis que les valeurs d'un groupe des paramètres sont ajustées par optimisation, les valeurs des autres paramètres sont fixées par expertise. Elle a été appliquée avec succès pour l'adaptation du modèle STICS à différentes espèces cultivées (Ghiloufi, 1999 ; Dorsainvil, 2002 ; Flenet *et al.*, 2005 ; Launay *et al.*, 2005) ou à des nouvelles variétés (Houlès, 2004 ; Brisson *et al.*, 2005). Son utilisation permet d'obtenir des informations intéressantes pour la compréhension du système (Houlès, 2004).

5.2. Optimisation des paramètres en utilisant le forçage du LAI

Nous avons utilisé la version de STICS qui permet de forcer le LAI à partir des données mesurées (cf.§ I.4.3.2.), car notre objectif dans un premier temps était de fixer un certain nombre de paramètres, en maîtrisant cette variable d'état centrale dans le modèle. Les dates de débourrement et de récolte ont été fixées, pour également contrôler le cycle de croissance et le développement de la vigne.

5.2.1. Optimisation et ajustement des paramètres du sol.

Dans un premier temps, nous avons voulu nous assurer que les caractéristiques du sol et d'établissement de la culture étaient bien établies.

- *Utilisation de la méthode d'inversion du modèle à partir des données de potentiel de base.*

Dans les parcelles où avaient été faites des mesures de potentiel de base, nous avons réalisé un ajustement des paramètres sol, en utilisant la méthodologie d'inversion du modèle à partir des mesures du potentiel de base (cf.§. I.4.3.2). Pour cela, nous avons utilisé l'ensemble des mesures d'une même parcelle (toutes années confondues), en tenant compte du cépage et du porte-greffe. Ce dernier point est basé sur l'hypothèse des différences de développement et de distribution des racines et de comportement du cep, quand des porte-greffes différents sont utilisés sur un même sol donné (Ollat et Lafontaine, 2003 ; Ollat *et al.*, 2003 ; Agut *et al.*, 2005 ; Costa Leme *et al.*, 2005). D'autre part, le paramètre *Q0* (voir Tableau 11) a été ajouté à la liste des paramètres à optimiser. Ce paramètre détermine le cumul d'évaporation potentielle journalière après une pluie ou une irrigation, à partir duquel on considère l'évaporation comme une fonction du type du sol et du climat (Brisson, 2002c).

Dorsainvil (2002) avait considéré que ce paramètre était important à ajuster, à cause de son importance dans le calcul de l'évaporation du sol et donc pour le bilan hydrique.

- *Ajustement du paramètre Q_0 à partir de la réserve hydrique du sol*

Dans les parcelles où nous avons des mesures d'humidité des différents horizons du sol, nous avons calculé la réserve hydrique totale du sol. Celle-ci a servi à l'ajustement du paramètre Q_0 , ainsi qu'au contrôle des différentes valeurs des caractéristiques hydrodynamiques du sol (estimées par des règles de pédotransfert).

5.2.2. Optimisation des paramètres plante qui dépendent du LAI

Seuls les paramètres qui permettent de simuler la croissance totale et ses dépendances (azote) ont été optimisés avec forçage du LAI : les paramètres qui déterminent l'efficacité de conversion et qui gèrent la croissance en biomasse (*EFCROIVEG*, *EFCROIREPRO*) ; le paramètre qui contrôle la remobilisation des réserves (*REMOBRES*) ; et un paramètre qui est directement lié à l'alimentation azotée de la plante (*VMAX2*). L'optimisation de ces paramètres a été réalisée simultanément par rapport aux données mesurées de biomasse sèche totale (t/ha) (*MASEC*) et de quantité d'azote total dans la plante (kg/ha) (*QNPLANTE*). Ces paramètres ont été considérés dépendants de l'espèce (**Tableau 18**).

5.3. Optimisation des paramètres plante sans forçage du LAI

Tous les autres paramètres ont été optimisés sans forçage du LAI, car leur valeur contrôle le LAI ou dépend de rétroactions feuilles-fruits.

5.3.1. Optimisation des paramètres généraux de la plante

Tout d'abord une optimisation des paramètres dépendants de l'espèce a été réalisée. Pour cela, nous avons utilisé toutes les données, sans tenir compte du cépage.

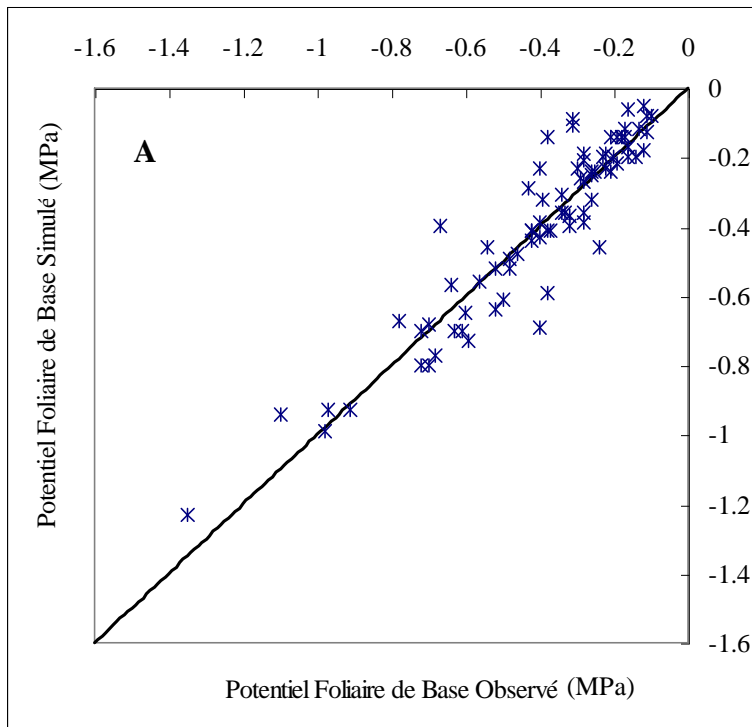
Dans un premier temps, nous avons réalisé une optimisation des paramètres qui gèrent différentes composantes du feuillage (*INNIMIN*, *INNSEN*, *RAPSENTURG*, *DLAIMAXBRUT*, *SLAMAX*), les niveaux minimaux de contrainte trophique (*SPLAIMIN*, *SPFRMIN*) et la résistance stomatique (*RSMIN*). Pour tenir compte de la concurrence entre les feuilles et fruits pendant la croissance, nous les avons optimisés simultanément par rapport au LAI et à la matière sèche des fruits (*MAFRUIT*), de façon à bien représenter la compétition feuille-fruits. La quantité d'azote totale dans la plante (*QNPLANTE*) était aussi utilisée pour l'ajustement de *INNIMIN* (**Tableau 18**).

Ensuite, nous avons optimisé séparément deux paramètres en fonction de la variable de sortie qu'ils contrôlent : *VITIRAZO*, qui a été optimisé par rapport à la quantité d'azote dans les fruits (*QNGRAIN*) et *TEMPDESHYD*, qui a été optimisé par rapport à la variable teneur en eau des fruits à la récolte (*H2OREC*) (**Tableau 18**).

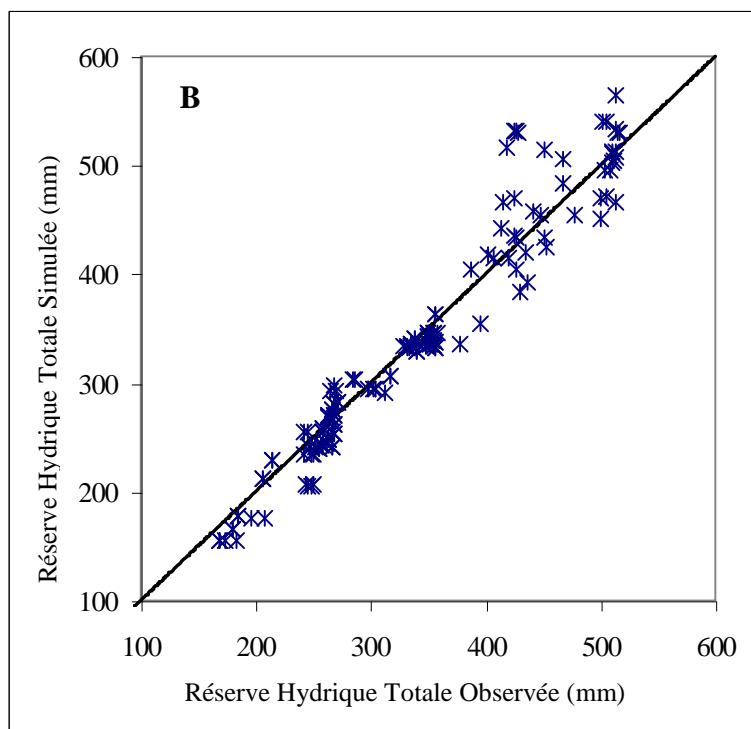
5.3.2. Optimisation des paramètres variétaux

Certains paramètres ont été considérés comme dépendants de la variété. Ces paramètres ont été optimisés en utilisant pour chaque variété, toutes les régions où ils étaient présents (cas du Pinot noir

Figure 21. Valeurs observées et simulées **a)** du potentiel de base (MPa) et **b)** de la réserve hydrique totale mesurée (RESMES) respectivement. Valeurs des différents critères statistiques.



Critères Statistiques	Ψ_b
Nombre d'observations	78.00
Moyenne	-0.41
Efficience du modèle	0.85
RMSE	0.09
RRMSE	-0.23
RMSEs	0.01
RMSEu	0.09
Biais (MD)	0.00



Critères Statistiques	Réserve Hydrique
Nombre d'observations	156.00
Moyenne	333.11
Efficience du modèle	0.94
RMSE	25.84
RRMSE	0.08
RMSEs	11.51
RMSEu	23.14
Biais (MD)	-2.76

et du Chardonnay en Bourgogne et Champagne, et du Grenache et du Syrah en Côtes du Rhône et Languedoc).

Les paramètres qui sont liés au rendement (*AFRUITPOT*, *PGRAINMAXI*) ont été optimisés ensemble, par rapport au nombre de fruits (*NBFRUIT*), le LAI et la matière sèche des fruits (**Tableau 18**). (*MAFRUIT*) simultanément. L'introduction de la variable LAI dans cette optimisation avait le même objectif qu'auparavant : tenir compte de la concurrence entre les feuilles et les fruits.

Enfin, *DESHYDBASE* a été optimisé par rapport à la teneur en eau des fruits à la récolte (*H2OREC*).

5.4. Qualité des résultats des optimisations

Cette partie a pour objet, non pas d'évaluer le modèle, mais de qualifier la qualité des ajustements réalisés.

5.4.1. Qualité de l'ajustement des paramètres du sol

Les Figure 21 montre la comparaison des valeurs simulées et observées du potentiel de base et de la réserve hydrique, avec le LAI forcé, pour toutes les parcelles optimisées.

Les valeurs des différents critères statistiques montrent une bonne simulation du potentiel de base par STICS et améliorent nettement les résultats de de Munter (2004), ce qui peut s'expliquer par l'utilisation des mesures du LAI (dans son cas le LAI était estimé) (cf.§ I.4.3.3.). La simulation de la réserve hydrique se montre aussi très satisfaisante.

Ces résultats nous ont permis de considérer que les différents paramètres du sol étaient à présent bien ajustés, et donc qu'ils pouvaient être utilisés par la suite, de manière à assurer un bon fonctionnement du sol. Les valeurs des différents paramètres du sol après ajustement sont montrées dans le Tableau 1-Annexe IV.

5.4.2. Qualité de l'ajustement des paramètres de la plante

Pour estimer la qualité de l'ajustement, nous représentons les variables de sortie du modèle en comparaison des mesures réalisées, variables utilisés pour la plupart dans les procédures d'optimisation. Ces variables représentent la croissance et le développement de la plante : le LAI, la matière sèche totale et des fruits (*MASEC* et *MAFRUIT*), le nombre de baies (*NBFRUIT*), la quantité d'azote dans la plante et dans les grains (*QNPLANTE*, *QNGRAIN*¹), la hauteur du feuillage (*HAUTEUR*), la biomasse fraîche totale et le rendement frais (*MAFRAIS* et *PDSFRUITFRAIS*), la teneur en eau des fruits à la récolte (*H2OREC*), la matière sèche du "bois de taille" (*MABOIS*), les différents stades phénologiques (débourrement, floraison, véraison), et la récolte.

L'évaluation se fait aussi sur l'état hydrique du sol : la réserve hydrique (*RESMES*) et le potentiel de base (*PSIBASE*), sans forçage du LAI.

Les Figure 22 et Figure 23 présentent les graphiques comparant les données simulées et observées des différents variables et le Tableau 19 montre les valeurs des critères statistiques utilisés (cf. II. 3). Le Tableau 2-Annexe IV montre les valeurs des différents paramètres optimisés.

¹ Nous avons utilisé seulement les données de l'année 2004, car les valeurs de 2005 n'étaient pas disponibles au moment des optimisations.

Figure 22. Resultat de la comparaison entre les valeurs observées et les valeurs simulées des différents stades phénologiques et de la date de la récolte. Les valeurs en couleur bleue définissent le stade du débourrement; les valeurs en couleur rose définissent le stade de floraison; les valeurs en orange définissent le stade de véraison; et les valeurs en mauve correspondent aux dates de récolte. Les données de la région de Languedoc sont introduites avec celles du Côtes du Rhône.

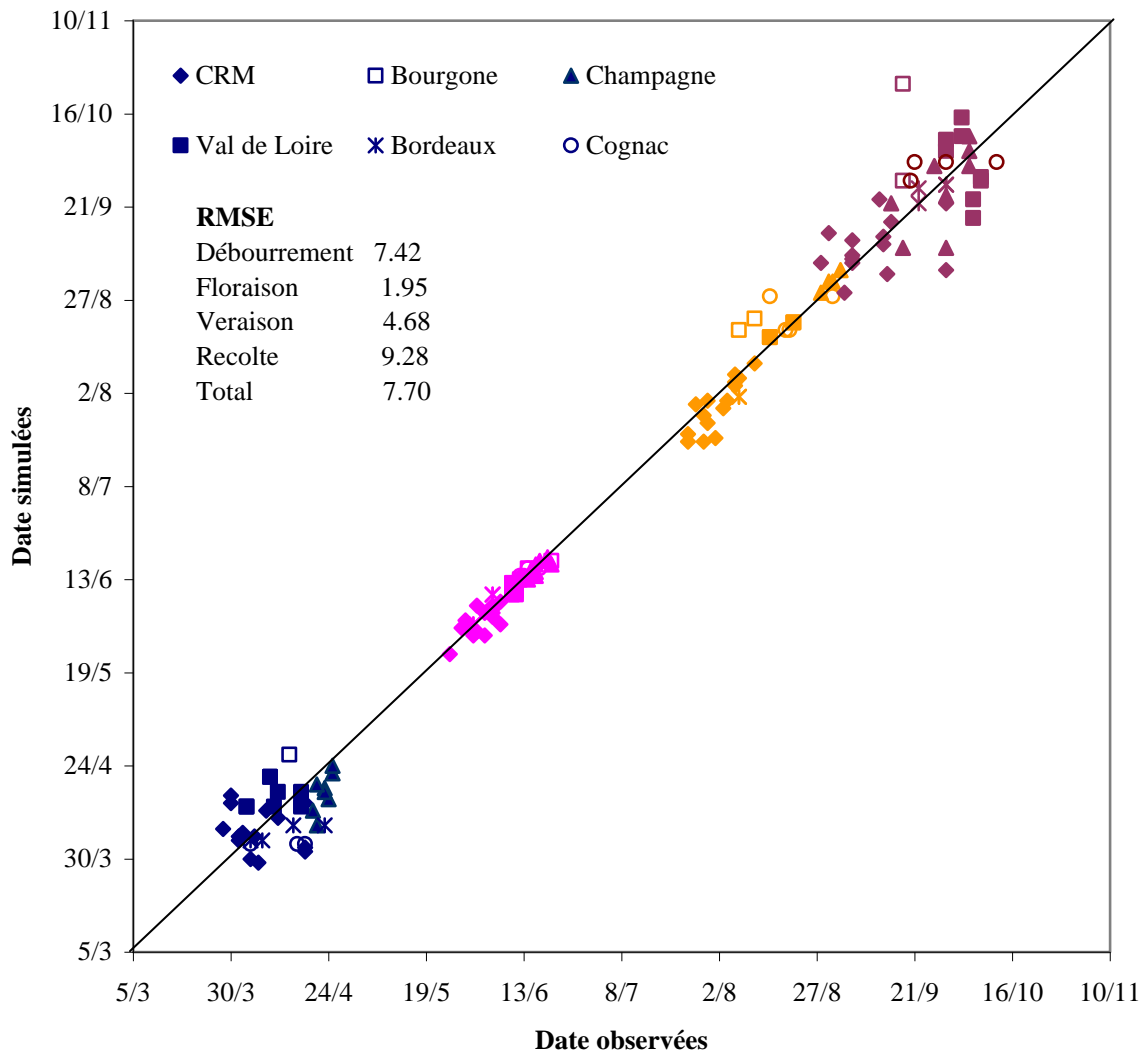


Figure 23. Graphiques des différentes variables simulées par le modèle: **a)** LAI; **b)** Matière Sèche Totale (t/ha); **c)** Matière Sèche Fruits (t/ha); **d)** Poids de Bois de taille (t/ha); **e)** Matière Fraîche totale (t/ha); **f)** Rendement Frais (t/ha). Comparaison entre les valeurs observées et les valeurs simulées. Les données de la région de Languedoc sont introduites avec celles du Côtes du Rhône.

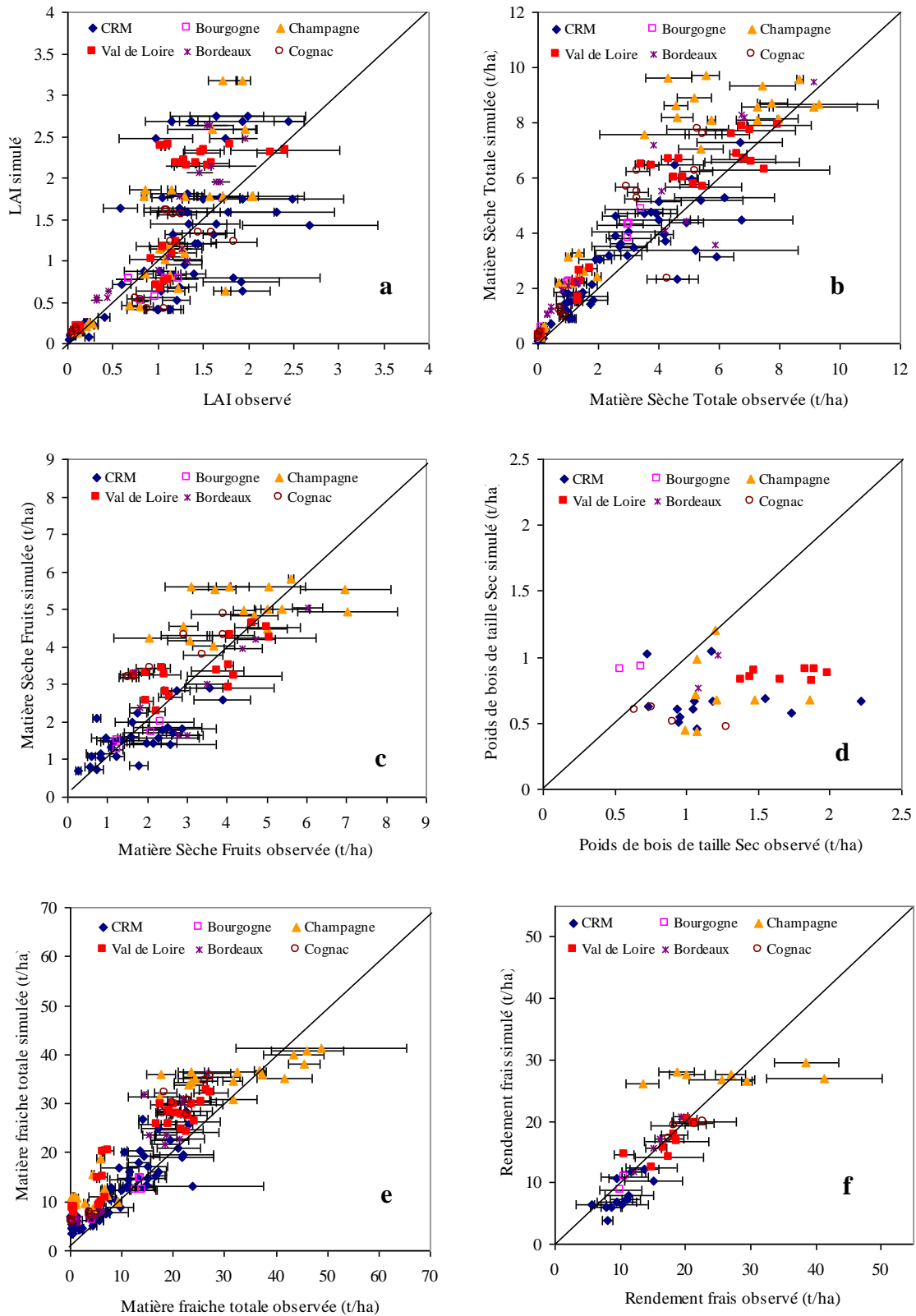


Figure 23 (suite). Graphiques des différentes variables simulées par le modèle: **g**) Réserve hydrique (mm); **h**) Potentiel foliaire de base (bars); **i**) Quantité d'azote dans la plante (kg/ha); **j**) Quantité d'azote dans les fruits (kg/ha); **k**) Nombre des fruits simulés (fruits/m²); **l**) Teneur en eau des fruits (%); **m**) hauteur (m). Comparaison entre les valeurs observées et les valeurs simulées. Les données de la région de Languedoc sont introduites avec celles du Côtes du Rhône.

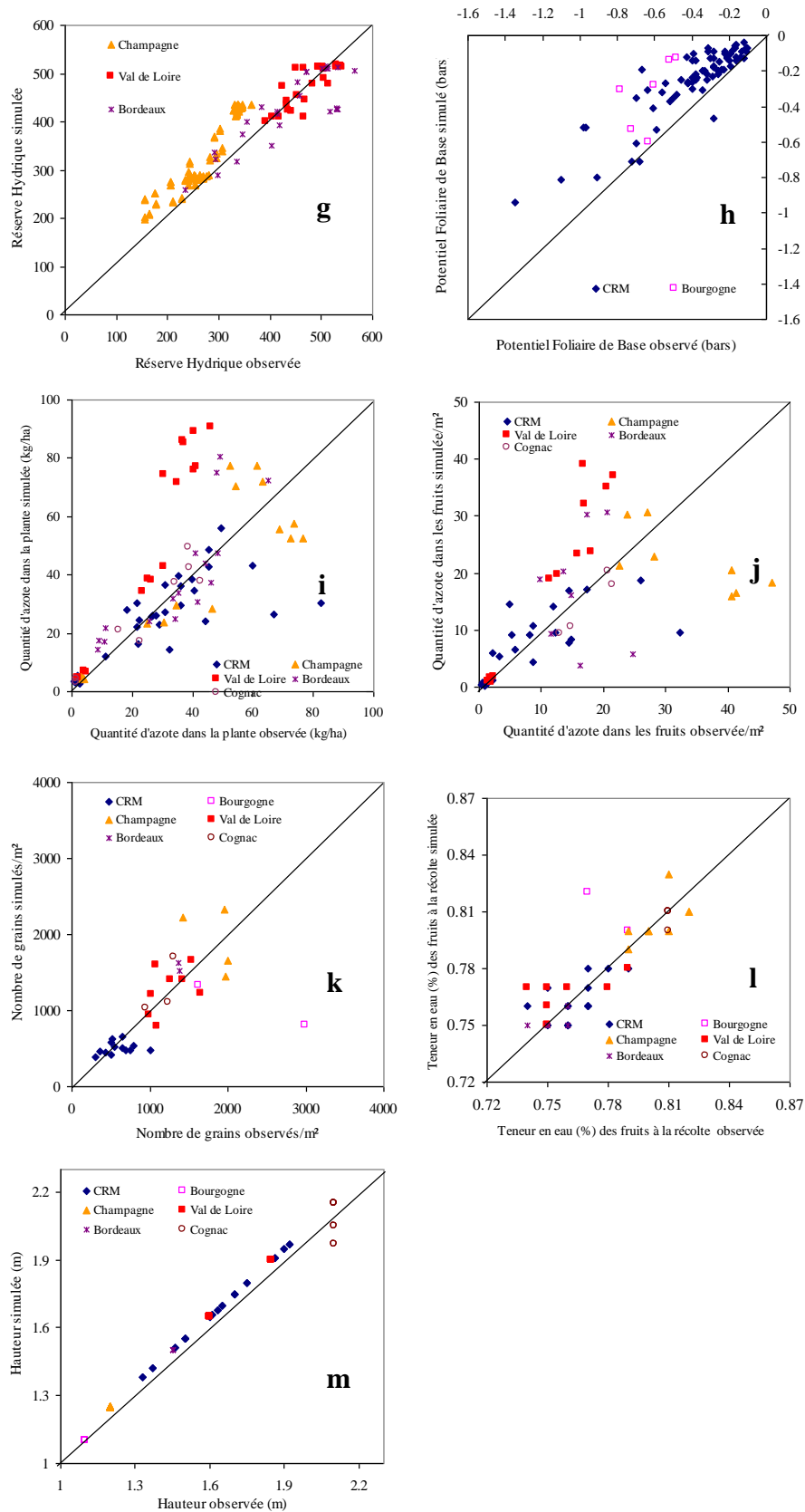


Tableau 19. Resultats des différents critères statistiques appliqués aux différents variables étudiées.

	LAI	Matière sèche totale	Matière sèche fruits	Réserve hydrique	Quantité azote dans la plante	Quantité azote dans les fruits	Nombre des fruits
Nombre d'observations	162	161	79	156	88	67	33
Moyenne	1.05	2.80	2.87	333.11	31.37	12.25	1105.24
Efficience du modèle	0.29	0.80	0.68	0.71	0.33	0.40	0.37
RMSE	0.54	1.14	0.87	55.40	16.70	8.92	464.63
RRMSE	0.51	0.41	0.30	0.17	0.53	0.73	0.42
RMSEs	0.14	0.55	0.35	40.87	3.94	4.17	200.73
RMSEu	0.52	1.00	0.80	37.40	16.23	7.88	419.04
MD	-0.14	-0.55	-0.11	-35.37	-3.23	0.64	98.60

	Hauteur du feuillage	Potentiel de base	Poids de bois de taille	Matière fraîche	Rendement frais	% eau à la récolte
Nombre d'observations	78	78	37	157	41	40
Moyenne	1.57	-0.41	1.24	12.36	16.19	78
Efficience du modèle	0.97	0.52	-1.53	0.69	0.67	0.81
RMSE	0.05	0.17	0.66	6.17	4.59	1
RRMSE	0.03	-0.42	0.53	0.50	0.28	1
RMSEs	0.04	0.14	0.63	4.56	1.15	0
RMSEu	0.03	0.10	0.19	4.16	4.44	1
MD	-0.04	-0.12	0.50	-4.41	0.17	0

- *La phénologie et la récolte*

La simulation de la phénologie montre que les paramètres qui gèrent le développement à l'intérieur du modèle fonctionnent correctement (Figure 22). Le débourrement est le stade qui présente la dispersion et l'erreur les plus importantes. Cependant, cette erreur disparaît pratiquement quand le modèle simule les dates de floraison et de véraison. La récolte, qui n'est pas reconnue comme un stade phénologique en lui-même, montre la dispersion la plus importante. Le calcul de cette date a été réalisé en fonction de la teneur en eau finale des fruits calculée par le modèle. Cependant, parfois la récolte se fait le même jour pour les blocs d'une parcelle pour des raisons techniques. D'autre part le modèle ne prend pas en compte d'autres critères intervenant sur la décision de vendanger (situation phytosanitaire, apparition des pluies autour des dates de vendange prévues).

- *LAI et hauteur du feuillage*

La simulation du LAI (Figure 23-a) ne s'avère pas tout à fait satisfaisante. Nous observons une grande dispersion. L'efficacité du modèle est aussi très basse, donnant dans ce cas plus de crédibilité à la moyenne des mesures réalisées au champ qu'à la simulation faite avec le modèle. Des explications de cette mauvaise simulation peuvent être trouvées dans l'importance des écart-types de nos mesures et le faible nombre de mesures (4) réalisées au cours du cycle. Même si les mesures étaient réalisées aux étapes les plus importantes de la croissance de la plante (cf. § II.2.4.2), nous avons pu négliger des moments importants de la phase végétative. Cependant, ce jeu de paramètres a été testé sur une autre étude sur la vigne, avec plus des mesures de LAI et les résultats se sont avérés satisfaisants (Celette *et al.*, 2006).

Le modèle simule très bien la hauteur du feuillage (Figure 23-m), ce qui nous laisse espérer que les autres variables du feuillage, et qui sont en relation avec l'interception du rayonnement, les seront aussi (non contrôlé dans notre étude).

- *Biomasse sèche et fraîche*

Les valeurs de matière sèche et fraîche des fruits (Figure 23-c et f), sont assez bien simulées. On observe toujours d'importantes erreurs de dispersion. L'efficacité du modèle reste assez élevée. Seule la région de Champagne montre des rendements pas très bien simulés (les valeurs simulées plafonnent autour des 30t/ha). Ceci peut être dû à deux éléments : d'une part la méthode de calcul du nombre de grappes par cep dans le modèle (problème déjà mentionné dans le chapitre I.5.3.2.), et peut-être également à la représentativité de l'échantillonnage utilisé pour déterminer le rendement observé.

Dans le cas des valeurs de biomasse totale (sèche ou fraîche) (Figure 23-b et d), on observe une surestimation pratiquement constante, même si les critères statistiques d'évaluation sont similaires à ceux de la biomasse des fruits. On observe aussi que le "poids de bois de taille" (MABOIS) simulé par le modèle montre des très mauvais résultats (Figure 23-d). Nous avons considéré que ces deux éléments étaient liés. En effet, dans le modèle STICS, la variable simulée qui définit la matière sèche totale tient compte de la biomasse sèche des fruits, des feuilles, des rameaux et des réserves. En revanche, nous n'avons pas mesuré sur le terrain cette biomasse de réserves (mesure difficile à réaliser) et donc elle n'a pas été considérée dans le calcul des valeurs de la biomasse sèche totale observée.

A partir de cette constatation on peut considérer que les paramètres optimisés qui gèrent la croissance de la biomasse totale (*EFCROIVEG* et *EFCROIREPRO*) ont été sous-estimés. En revanche, le fait d'avoir optimisé dans un second temps les paramètres qui gèrent la biomasse des fruits, a permis de bien estimer la valeur de la biomasse allouée aux fruits (*MAFRUITS*), au détriment des autres compartiments (les rameaux, les feuilles et les réserves). Ceci explique la sous-estimation permanente de MABOIS.

- *Quantité d'azote*

La simulation de la teneur en azote des plantes et des fruits présente beaucoup de dispersion et la qualité de la simulation dépend de chaque région (Figure 23-i et j). Par exemple, dans la région du Val de Loire, les valeurs à la récolte sont surestimées, sans que l'on puisse donner une explication concrète. Dans le cas de la Champagne, c'est surtout la simulation de la quantité d'azote dans les fruits qui est conditionnée par le plafonnement des rendements montré auparavant. Pour ces deux variables la plus grande partie de l'erreur s'explique par la dispersion, alors que les biais sont faibles.

- *Nombre et teneur en eau des baies*

Le nombre de baies est bien simulé de façon générale (Figure 23-k), mais les valeurs des critères statistiques ne sont pas très bonnes, à cause du fort impact de la mauvaise simulation d'une parcelle du vignoble de Bourgogne. Nous n'avons pas pu trouver d'explication plausible pour ce cas concret.

La teneur en eau des fruits à la récolte est assez bien simulée avec une très faible dispersion (Figure 23-l). On observe cependant une surestimation assez importante du calcul de la teneur en eau dans une des parcelles de Bourgogne (parcelle de Pinot Noir). Il faut toutefois faire attention aux valeurs obtenues, car en raison de la gamme des valeurs contrôlées (entre 73 et 84 %), une erreur de 1% peut avoir beaucoup d'impact (1% d'erreur correspond à une erreur de 13.5g sucre/L).

- *Réserve hydrique et potentiel de base*

La réserve hydrique du sol est en général bien simulée, même si l'on observe une faible surestimation dans les parcelles de Champagne (Figure 23-g). Cette surestimation peut être due à la difficulté de bien estimer la quantité réelle d'eau remontée par capillarité qui existe dans ces parcelles.

De plus, le potentiel foliaire de base est surestimé (Figure 23-h). Ceci est dû à l'impact de la mauvaise qualité de simulation du LAI, qui se fait sentir dans la qualité de la simulation de cette variable (différences avec la Figure 21). Cela confirme l'intérêt de ce paramètre pour faire l'inversion du modèle et pouvoir travailler sur les paramètres qui décrivent le sol (cf.§ II 5.4.1.), mais il est encore trop tôt pour l'utiliser comme variable de sortie directe du modèle.

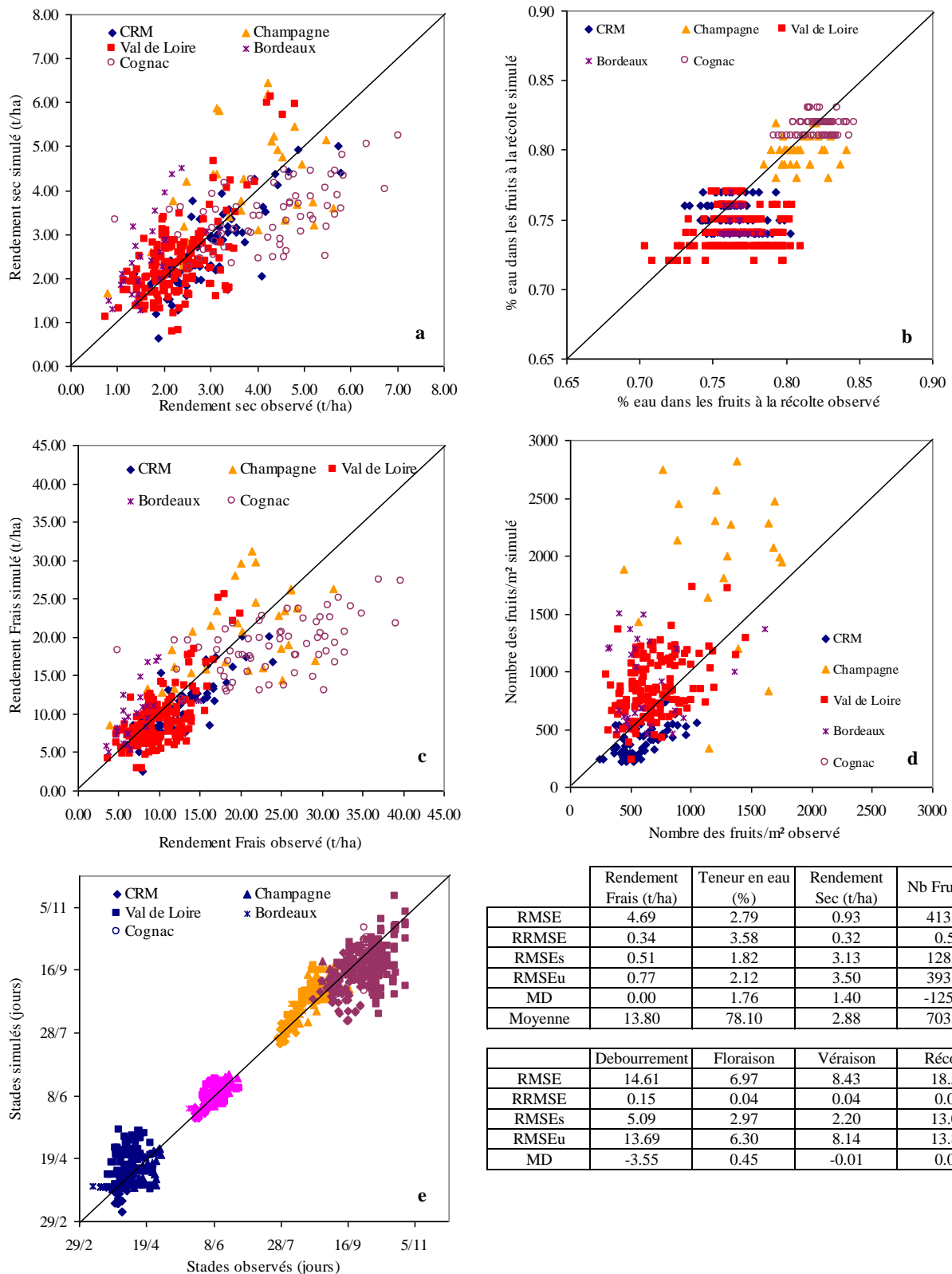
6. Validation du modèle avec la Base de Données Historiques

6.1. Méthode et variables de la validation du modèle

La validation du modèle a été réalisée sur l'ensemble des parcelles récupérées dans la BDH (Tableau 8). Les variables sur lesquelles a été réalisée la validation sont : le rendement sec et frais (MAFRUIT et MAFRUITFRAIS), la teneur en eau des fruits (H2OREC), le nombre de baies (NBGRAINS), les stades phénologiques observés (Débourrement, Floraison, Véraison), et la date de récolte.

Les différentes variables du rendement ont été simulées, en forçant les stades de débourrement et de récolte. De cette façon, nous voulions déterminer la capacité du modèle à simuler la croissance de la plante en fonction des dates observées réellement. Ensuite, nous avons validé la simulation des

Figure 24 Validation du modèle sur la base des données historiques. Comparaison entre les valeurs observées et les valeurs simulées de **a)** Rendement sec, **b)** teneur en eau des fruits, **c)** Rendement frais, **d)** Nombre des fruits et **e)** la Phénologie et la date de vendanges. Les données de la région de Languedoc sont introduites avec celles du Côtes du Rhône.



différents stades phénologiques sans forçage. Les critères statistiques calculés sont ceux définis dans la partie 3 de ce chapitre, identiques à ceux utilisés précédemment.

6.2. Résultats de la validation

6.2.1. Validation des variables qui composent le rendement

La Figure 24 compare les valeurs observées de la BDH et les valeurs simulées par le modèle pour les 347 parcelles, et indique les critères statistiques.

Dans le cas des rendements frais et sec (Figure 24-a et c), nous avons obtenu des valeurs d'erreurs similaires à celles du paramétrage. Les valeurs de RRMSE et RMSE sont légèrement supérieures dans les deux cas. Cependant, contrairement aux résultats du paramétrage, l'erreur s'explique autant par le biais du modèle que par la dispersion. Il est intéressant de remarquer que la moyenne des rendements secs de la BDH coïncide avec celle de la BDE, ce qui montre la bonne représentativité de la BDE, par rapport à la large gamme de situations montrées dans la BDH. On peut considérer que dans ce cas la simulation du modèle s'avère tout à fait satisfaisante.

La simulation de la teneur en eau est sous-estimée dans la plupart des sites (Figure 24-b). La valeur de la RMSE est plus élevée qu'avec les données de paramétrage (0.03 contre 0.01). Cette sous-estimation de la teneur en eau des fruits (ou surestimation de la teneur en alcool) peut s'expliquer par deux éléments : d'une part, un effet du climat des années utilisées pour réaliser le paramétrage du modèle, lesquelles ont été plus chaudes que la moyenne des 12 dernières années utilisées pour la validation (Figure 13), et auraient pu avoir un impact direct sur la valeur des paramètres qui gèrent l'évolution de la teneur en eau des fruits (accélération trop importante). D'autre part, la sensibilité du calcul de la température de culture (variable qui gère l'accélération de la diminution de la teneur en eau) aux données météorologiques utilisées pour les simulations, lesquelles n'étaient pas toujours récupérées sur des stations très proches de la parcelle. Ceci va avoir un impact sur la simulation de la date de vendange, comme nous allons voir par la suite.

Les valeurs du nombre des baies (Figure 24-d) ne sont pas très bien simulées par le modèle avec les données de la validation et présentent une dispersion généralisée dans les différentes régions de l'étude. Ceci peut s'expliquer par le fait que le nombre maximal de grappes est considéré dans STICS comme un paramètre génétique, alors qu'en réalité, il dépend du type de taille (cf. § I.5.3.2). Dans notre cas, le nombre maximal de grappes a été fixé par cépage et selon une valeur moyenne du nombre de bourgeons laissés par type de taille, ce qui limite la précision du calcul du nombre de baies. D'autre part, il faut rappeler que le nombre expérimental de fruits est calculé à partir du poids d'une baie et du rendement, ce qui peut nuire à sa précision. Par conséquent, la qualité de la comparaison avec la valeur simulée par le modèle peut être dégradée.

6.2.2. Validation des variables phénologiques et la récolte

La Figure 24-e présente les résultats de la comparaison entre les valeurs simulées des stades phénologiques et les données observées dans la BDH.

La date de débourrement présente une erreur plus importante que celle montrée avec le jeu de données pour le paramétrage (RMSE = 14 jours contre 7 jours). Il semble que ce stade phénologique soit très dépendant des conditions climatiques de la parcelle et donc que sa bonne simulation soit très sensible à

la distance entre la station météorologique et la parcelle de mesure. De plus, dans certains cas nous avons utilisé les mêmes données météorologiques pour plusieurs parcelles avec le même cépage (certaines parcelles du Val de Loire, (Coulon, 2006)), ce qui a donné comme résultat la même date, dans toutes les parcelles.

Pour la Floraison et la Véraison, les résultats de la validation vont dans le même sens que ceux du paramétrage, même si les erreurs sont plus importantes (RMSE Floraison = 7 jours contre 2 jours pour le paramétrage ; RMSE Véraison = 8 jours contre 5 jours pour le paramétrage). Contrairement au débourrement, ces stades semblent moins dépendants des conditions climatiques à l'échelle de la parcelle.

Enfin, la sous-estimation de la simulation de la date de vendange est directement liée à la sous-estimation de la teneur en eau des fruits. Si quand nous faisons la simulation avec le forçage des dates de vendange nous obtenons des valeurs de teneur en eau plus basses que les observées, il est logique d'obtenir des dates de récolte plus précoces, une fois enlevé ce forçage. Pour évaluer l'importance de cet élément, nous avons contrôlé les dates de vendange des parcelles de la BDH des années 2004 et 2005. Ainsi dans ces cas la RMSE obtenue dans ce cas est égale à 11 jours (contrairement aux 18 jours d'erreur), lequel est très proche de la valeur obtenue avec les parcelles du paramétrage (9 jours). Ceci confirme ainsi l'impact des années 2004 et 2005 sur le paramétrage final du modèle (en terme de calcul de la teneur en eau et de date des vendanges) ou d'autre part l'impact de la distance de la station météorologique dans le calcul de la température de culture (sachant que pour ces parcelles de 2004 et 2005, les données météorologiques étaient issues des stations proches aux parcelles).

7. Capacités et limites du modèle STICS pour simuler le fonctionnement de la vigne

D'une façon générale, le modèle calcule de façon satisfaisante le fonctionnement de la vigne à l'échelle de la France.

La méthode de paramétrage du modèle est satisfaisante, car elle permet d'une part, l'estimation des différents paramètres, et d'autre part une meilleure compréhension du modèle. Ainsi, l'analyse des différents formalismes (cf.§. II), l'analyse des différentes sources bibliographiques, la mise en place d'expérimentations permettant l'obtention de certains paramètres et les différentes techniques d'optimisation multivariées, s'avèrent être la méthodologie adéquate pour le paramétrage et évaluation d'un modèle si complexe et détaillé qu'est le modèle STICS.

Néanmoins, le jeu de données nécessaire pour le paramétrage du modèle (dans notre cas la BDE) reste très important et difficile à mettre en œuvre. La quantité de mesures à réaliser peut devenir trop importante en fonction du type de taille et le coût en main d'œuvre peut devenir trop élevé. La qualité de l'échantillonnage est aussi très importante, et parfois l'hétérogénéité des parcelles peut mettre en péril la représentativité des données mesurées. Il est alors important d'établir un protocole de contrôle qui pourrait permettre de s'affranchir de l'hétérogénéité interne de la parcelle (dans la plupart des cas due à l'alimentation hydrique) (Ojeda *et al.*, 2005, Tisseyre *et al.*, 2005). Le LAI apparaît comme une variable très sensible à l'échantillonnage (écart-types expérimentaux très élevés), alors que les autres variables mesurées (biomasse totale et quantité d'azote) sont plus stables.

Le jeu de données utilisé pour la validation (BDH) était très large et sa qualité variée. Cependant, sa mise en place a été confrontée à de nombreuses problèmes en ce qui concerne le renseignement des différentes informations du climat : représentativité des données météorologiques par rapport à la proximité de la station d'enregistrement ou séries de données incomplètes ; du sol : des valeurs estimées par des règles de pédotransfert et l'estimation des profondeurs et des densités racinaires à partir des observations très ponctuelles du terrain ; et des itinéraires techniques : difficulté à retrouver les itinéraires techniques des différentes parcelles. Avec toutes ces limites, les résultats finaux sont très satisfaisants.

Le renseignement des paramètres qui définissent le sol reste un des principaux problèmes pour l'utilisation du modèle, car les informations nécessaires ne sont pas toujours mesurées en routine, en particulier les teneurs en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement. Dans ce sens, la méthodologie d'inversion du modèle sur des mesures de potentiel de base pour retrouver des paramètres du sol s'avère satisfaisante, mais elle a aussi des limites. Elle est néanmoins conditionnée par la bonne simulation du LAI par le modèle, faute de quoi elle ne peut pas être utilisée directement comme variable de sortie du modèle. Il faut aussi remarquer l'importance de l'impact du paramètre $Q0$ sur le calcul du bilan hydrique du sol (Dorsainvil, 2002 ; Lebon *et al.*, 2003), et donc la nécessité de considérer l'optimisation de ce paramètre pratiquement comme obligatoire. Le modèle simule bien les valeurs de la réserve hydrique, ce qui confirme les résultats obtenus par ailleurs pour des parcelles avec la vigne (Celette *et al.*, 2006). Il est très important de bien renseigner la teneur en cailloux et ses caractéristiques pour avoir de bonnes simulations du bilan hydrique. D'autre part, les résultats obtenus de la simulation des remontés capillaires (cas de parcelles de Champagne) montrent que cet aspect du modèle doit être approfondi dans le futur.

Les estimations de la biomasse totale (fraîche et sèche, totale et des fruits) s'avèrent correctes. Cependant, il faut tenir compte des réserves, pour l'interprétation de certaines sorties comme le poids de bois de taille (toujours sous-estimé). La mesure en dynamique des réserves dans la plante devient un élément à prendre en compte pour de futures expérimentations, ou il faudrait éliminer du calcul de la matière sèche totale, la partie représentant les réserves.

En ce qui concerne le feuillage, il faut remarquer que la simulation du LAI n'est pas réalisée très correctement par le modèle. La valeur mesurée de cette variable reste très sensible à l'échantillonnage. Il faudrait envisager de multiplier le nombre de mesures au cours du cycle de la vigne, de façon à mieux caractériser son évolution. Ces mesures, cependant, ne nécessitent pas forcément d'être destructives, mais plutôt d'estimation par des relations allométriques. D'autre part la hauteur du feuillage est bien simulée, ce qui laisse penser que la simulation simplifiée de la structure et de l'interception du rayonnement est bien prise en compte. Il reste néanmoins des éléments qui n'ont pas pu être pris en compte correctement par le modèle : le développement de la croissance des rameaux et des feuilles secondaires, la reprise de la croissance végétative dans certains cas à la fin de l'été, les différences entre variétés au niveau du fonctionnement des rameaux secondaires. Tous ces éléments devraient être pris en compte pour des futures améliorations du modèle.

Les variables qui composent le rendement dépendent largement de la variété. Ceci est en accord avec la bibliographie (Huglin et Schneider, 1998). Cependant, dans la validation du modèle, nous avons mis en évidence la nécessité de mettre en œuvre un module qui prenne en compte le type de taille, la charge en bourgeons laissés et l'induction florale, de façon à pouvoir bien simuler les différentes composantes du rendement (le nombre de grappes et le nombre de baies).

La teneur en eau finale des fruits (H2OREC) et la date de récolte sont sous-estimées systématiquement dans la validation. Cette sous-estimation a été expliquée par un effet des années climatiques chaudes utilisées dans notre étude (2004 et 2005) sur les paramètres qui contrôlent cette évolution (la température de culture) et par l'effet de la distance des postes météorologiques de la parcelle. Il faudra tenir compte de cet élément, lors de l'interprétation des résultats obtenus par la suite, avec les scénarios du changement climatique. Les résultats des séries passées risquent d'être sous-estimés (suite aux résultats obtenus dans la validation). Cependant les résultats des séries futures, étant plus en accord climatiquement avec les données de 2004 et 2005, peuvent être mieux estimés.

Le développement de la plante est bien simulé de façon générale (débourrement, floraison et véraison). La date du débourrement semble être très dépendante du climat de la parcelle et donc sa simulation est très dépendante de la distance au station météorologique. La floraison et la véraison sont très bien simulées, d'une manière générale.

Le modèle présente des limites de validité du fait qu'il n'a pas été confronté à toutes les situations présentes dans le vignoble. La large gamme de situations testées, défini à partir du jeu de données utilisé dans la BDE, ne permet cependant pas d'assurer un bon fonctionnement du modèle dans certains cas. Ainsi le modèle ne peut être utilisé pour simuler des vignes aux structures non-palissés (taille à porte libre comme le gobelet), des vignes larges avec deux plans de feuillage (taille type lyre ou pergola), des écartements entre les ceps sur le rang inférieurs à 1m (intensification de l'effet densité dans la croissance de la plante), ou des parcelles avec une pente importante (et donc la bonne prise en compte du ruissellement). Le ruissellement est néanmoins formalisé dans le modèle de manière à prendre en compte les pertes d'eau à la surface du sol (proportion d'eau ne s'infiltrant pas), mais ce formalisme n'a pas été testé dans notre cas. Il serait nécessaire de réaliser des expérimentations et des tests de sensibilité du modèle, afin d'étudier l'adaptabilité du modèle à ces situations et d'identifier ensuite les modifications ou ajouts de formalismes indispensables pour les décrire.

A la suite de ces résultats, le modèle STICS, dans sa version adaptée à la vigne, s'avère un outil suffisamment abouti pour être utilisé comme aide aux expérimentations, ou pour des études d'impact ou prospectives, et présente une importante robustesse pour être utilisé à l'échelle de la France. Nous sommes conscients que certains modules peuvent être améliorés et que la description de certains aspects de la plante et des variétés peut suivre un ajustement plus particulier (suite aux mises en place d'expérimentations spécifiques). Néanmoins, nous considérons la version présentée ici suffisamment performante pour un travail d'analyse des impacts du changement climatique à l'échelle des différentes régions viticoles (échelle régionale). La suite de ce travail va porter sur l'utilisation du modèle dans les différentes régions viticoles impliquées dans l'étude, en utilisant les différents scénarios futurs de changement climatique, ainsi que des itinéraires techniques différents et des sols différents, pour étudier par la suite leurs impacts sur le fonctionnement de la vigne.

Chapitre III

CHAPITRE III**Etudes d'impacts du changement climatique sur les différents vignobles de France à l'aide du modèle STICS.**

1. Introduction	173
2. Le changement climatique et son impact sur la vigne. Etat des lieux.....	173
2.1. Le changement climatique	173
2.2. Le changement climatique et la vigne.....	177
3. Données, méthodes utilisés et description du protocole de simulation.....	185
3.1. Données météorologiques	187
3.2. Choix de structures de plantation et de pratiques techniques pour réaliser les simulations	193
3.3. Les formalismes du modèle STICS pour l'étude du changement climatique.....	197
3.4. Variables de sortie étudiées.....	199
3.5. Méthodologie utilisée pour analyser les impacts du changement climatique	199
4. Impacts du changement climatique sur les différentes régions viticoles, selon leur structure actuelle.	203
4.1. Phénologie et date de vendange	203
4.2. Stress	209
4.3. Biomasse et LAI.....	211
4.4. La maturation du raisin	221
4.5. Environnement	227
4.6. Résumé des principaux résultats	227
5. Etude pour la proposition de stratégies d'adaptation au changement climatique dans les différents vignobles de l'étude.....	229
5.1. Méthodologie développée	229
5.2. Stratégies évaluées dans chaque région	233
6. Considérations générales et limites de notre étude d'impacts	251

1. Introduction

La dernière partie de ce travail concerne l'étude d'impacts du changement climatique sur le comportement productif et qualitatif de la vigne dans les différentes régions de notre étude à l'aide du modèle STICS.

La première partie de ce chapitre est dédiée à la description des principaux changements climatiques attendus à la fin du siècle de manière globale. Dans cette partie, sont également décrits les impacts déjà observables sur la viticulture de par l'évolution du climat ces dernières années, ainsi que les premières prévisions d'impacts futurs.

La deuxième partie décrit la méthodologie mise en place pour utiliser les données climatiques issues des simulations de scénarios du changement climatique, ainsi que le protocole de simulation utilisé, afin d'étudier une large gamme de situations techniques et pédologiques dans les différentes régions de l'étude : Côtes du Rhône, Languedoc, Bordeaux, Bourgogne, Champagne, Cognac, Anjou.

Dans la troisième partie, les résultats des simulations sont discutés et interprétés. Pour cela, nous étudions l'évolution des différentes variables écophysologiques de la plante (la phénologie, la production, les stress), des conditions climatiques de la maturation et leur impact sur la qualité, ainsi que des variables environnementales (stockage de carbone dans les sols viticoles).

Enfin, nous proposons à l'aide du modèle, des stratégies d'adaptation des techniques culturales de chacune des régions, pour minimiser les impacts et se maintenir le plus proche de la situation actuelle de chacune des régions, en terme de qualité et production.

Cette analyse des résultats permettra de donner des éléments de prospective pour les vignobles français à la fin de siècle, et pourra servir d'appui pour orienter les décisions à prendre à long terme.

2. Le changement climatique et son impact sur la vigne. Etat des lieux.

2.1. Le changement climatique

Ces dernières années nous avons assisté à des phénomènes climatologiques exceptionnels (tempête 1999, canicule 2003 et 2006, sécheresses 2003, 2004 et 2005, ainsi qu'une forte fréquence d'épisodes cévenols en automne) qui ont alimenté le débat public sur le réchauffement de la planète et ses impacts sur le climat.

2.1.1. *L'effet de serre*

A la base de ces changements climatiques et du réchauffement de la planète apparaît l'effet de serre. L'effet de serre est un phénomène naturel qui résulte de la présence dans l'atmosphère de gaz qui absorbent le rayonnement infrarouge thermique émis par la terre (H₂O, CO₂, N₂O, CH₄, O₃, les CFC et les HCFC). Il permet de maintenir une température moyenne de la terre autour de 15°C (sans cet effet de serre elle serait d'environ -18°C). Les gaz à effet de serre sont naturellement très peu abondants. Le questionnement de l'influence humaine sur le climat de la planète est apparu dans les années 1970, en

Figure 25. Indicateurs de l'influence anthropique dans les concentrations des gaz à effet de serre dans l'atmosphère pendant la période industrielle (issu du rapport de l'IPCC, 2001).

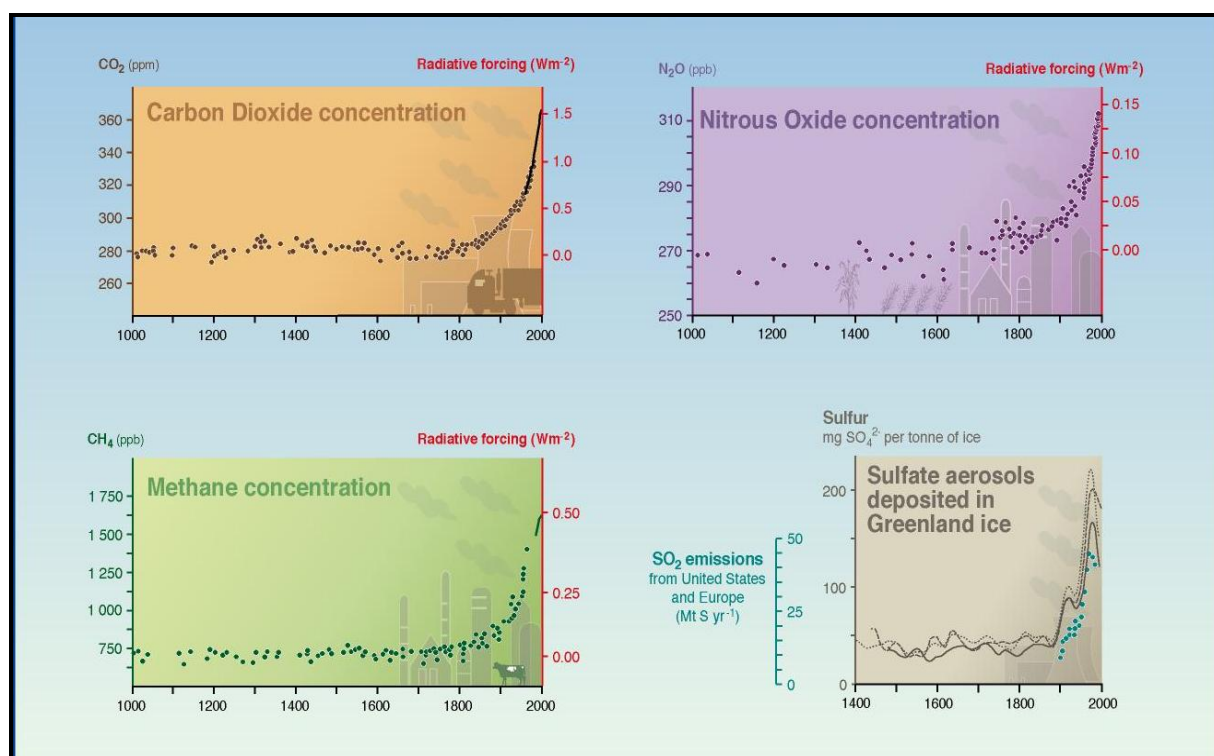


Tableau 20. Exemples de changements environnementaux observés au cours du XX^e siècle et attribués au réchauffement global (d'après IPCC, 2001).

Indicateurs de concentration	Changements observés
Concentration atmosphérique de CO ₂	280 ppm entre 1000 et 1750 et 368 ppm en 2000 soit une augmentation de 31+/- 4 %
Concentration atmosphérique de NH ₄	700 ppb entre 1000 et 1750 et 1750 en 2000 ppb en 2000 soit une augmentation de 151+/- 25 %
Concentration atmosphérique de N ₂ O	270 ppb entre 1000 et 1750 et 316 ppb en 2000 soit une augmentation de 17+/-5%
Indicateurs climatiques	
Température moyenne mondiale à la surface	Augmentation de 0,6+/-0,2% au cours du XX ^e siècle
Jours chauds/Jours froids	Augmentation des jours chauds et de l'indice de chaleur et diminution des jours froids et de gel pour la quasi-totalité des zones terrestres au cours du XX ^e siècle
Précipitations continentales	Augmentation de 5 à 10% au cours du XX ^e siècle dans l'hémisphère nord mais diminution sur certaines régions (méditerranée, Afrique Nord et Occidentale)
Fortes précipitations	Augmentation aux latitudes nord moyenne et supérieures
Indicateurs biologiques et physiques	
Niveau moyen de la mer à l'échelle mondiale	Augmentation à un taux annuel moyen de 1 à 2 mm/an au cours du XX ^e siècle
Glaciers non polaires	Régression étendue au cours du XX ^e siècle
Superficie et épaisseur de la glace marine arctique	Diminution de 40% de l'épaisseur au cours des dernières décennies de la fin de l'été au début de l'automne et de 10 à 15% depuis les années 1950 au printemps et en été
Couverture neigeuse	Diminution de 10% de la superficie observée depuis les premières observations par satellite vers 1960
Phénomène El Nino	Plus fréquents, plus intenses et plus longs au cours des 20-30 dernières années par rapport aux 100 ans passés
Espèces végétales et animales	Déplacement vers les pôles et en altitude dans le cas des plantes, insectes, oiseaux et poissons
Reproduction, floraison, migration	Floraison plus précoce, retour plus précoce des oiseaux, dates de saison de reproduction plus précoces et apparition plus précoce des insectes en hémisphère Nord

lien avec des observations de l'augmentation de la concentration en dioxyde de carbone, CO₂, résultant de l'activité anthropique (la concentration de CO₂ actuelle est d'environ 370 ppm, au lieu de 260 ppm à l'époque préindustrielle) (Figure 25). L'humanité postindustrielle aurait multiplié la respiration mondiale par environ 10 millions, par la combustion de plusieurs milliards d'années d'accumulation de produits de photosynthèse et autres carbones organiques (exploitation des réserves de charbon et de pétrole) (Schultz, 2000).

2.1.2. Les évolutions récentes

- *A l'échelle de la planète*

Des observations réalisées ces dernières années ont permis de déterminer une série de modifications qui ont déjà eu lieu et qui réaffirment la tendance globale du réchauffement de la planète (IPCC, 2001 ; Salinger, 2005) :

- ❖ un réchauffement de l'ordre de 0.6°C a été observé depuis 1860 (+0.95°C en Europe) (EEA, 2004) ;
- ❖ la dernière décennie est la plus chaude de toute la période étudiée : 9 des années les plus chaudes se situent entre 1995 et 2005 (l'année 2005 a été considérée comme l'année la plus chaude avec +0.6°C par rapport à la moyenne établie entre 1951 et 1990 (Hansen *et al.*, 2005)). La classification des années de la plus chaude à la moins chaude est la suivante : 1.- 2005 ; 2.- 1998 ; 3.- 2002 ; 4.- 2003 ; 5.- 2004 ; 6.- 2001 ; 7.- 1997 ; 8.- 1990 ; 9.- 1995 ; 10.- 1999 (adapté de Jones et Moberg, 2003 ; Hansen *et al.*, 2005) ;
- ❖ la pluviométrie dans les régions du nord de l'Europe a augmenté en particulier en hiver (+10-40%), et cependant elle a diminué dans la zone méditerranéenne (jusqu'à 20%, dont 10% en période estivale) (EEA, 2004) ;
- ❖ d'importantes variations ont été observées en ce qui concerne la cryosphère (diminution de la couverture neigeuse, retrait des glaciers et diminution de la glace de mer) et les océans (élévation du niveau moyen de la mer).

Pour les autres variables (rayonnement, vent, humidité) il n'apparaît pas de tendances claires (Seguin, 2006), ou leur étude n'est pas toujours facile en raison du manque de données historiques (Perarnaud *et al.*, 2005). Le Tableau 20 présente un résumé des changements environnementaux observés au cours du XX^{ème} siècle et attribués au réchauffement global (IPCC, 2001).

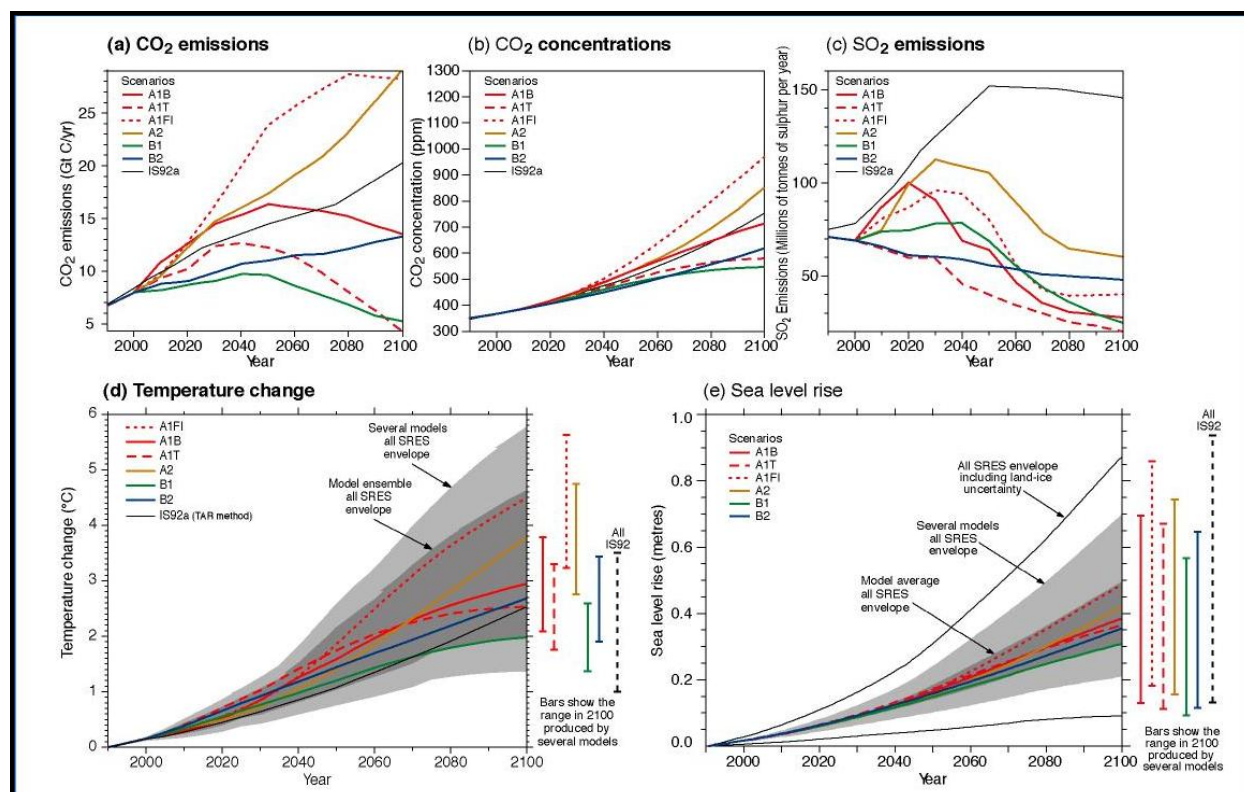
- *A l'échelle de la France*

En ce qui concerne les modifications du climat observées en France, on a observé une augmentation de la température moyenne au cours du siècle passé de l'ordre de 0.9°C (Moisselin *et al.*, 2002), plus particulièrement focalisée sur la dernière décennie (de 0.4 à 0.6°C). Pour la pluviométrie, la tendance est plutôt à la hausse avec moins de précipitations en été et plus en hiver. Moisselin *et al.*, (2003) montre une tendance à la diminution de l'insolation dans le nord (-11%) et une augmentation (+7%) dans le sud. On observe une augmentation des écarts de pluviométrie entre nord et sud d'une part, et entre saisons d'autre part, augmentation qui va s'accroître (Planton, 2003).

Tableau 21. Scénarios climatiques prévus par l'IPCC en fonction des différences tendances socio-économiques.

<p>A1: il est décrit une croissance économique très rapide, la population mondiale culminera au milieu du siècle pour décliner par la suite, et de nouvelles technologies plus efficaces seront introduites rapidement. Il est divisé en 3 sous-scénarios en fonction du niveau technologique: A1FI, A1T et A1B. La prévision pour ces scénarios est d'une augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère qui varie en fonction des niveaux technologiques entre 580 et 1000 ppm dans l'année 2100. Selon les modèles, cette augmentation serait accompagné d'une augmentation de la température moyenne du globe égale à 3.0°C (± 0.8 °C en fonction du modèle) pour le scénario A1B; de 2.5°C (± 0.7 °C en fonction du modèle) pour le scénario A1T; et de 4.5°C (± 1.3°C en fonction du modèle) pour le scénario A1FI.</p>
<p>A2: il est décrit un monde très hétérogène. La prévision pour ce scénario est d'une augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère jusqu'à environ 860 ppm dans l'année 2100. Selon les modèles, cette augmentation serait accompagné d'une augmentation de la température moyenne du globe égale à 3.8°C (± 1.0°C en fonction du modèle).</p>
<p>B1: il est décrit un monde convergent avec la même population mondiale culminant au milieu du siècle et déclinant par la suite, comme dans le canevas A1, mais avec des changements rapides dans les structures économiques vers une économie de services et d'information, avec des réductions dans l'intensité des matériaux et l'introduction de technologies propres et utilisant des ressources efficacement. La prévision pour ce scénario est d'une augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère jusqu'à environ 550 ppm dans l'année 2100. Selon les modèles, cette augmentation serait accompagné d'une augmentation de la température moyenne du globe égale à 2.0°C (± 0.7 °C en fonction du modèle).</p>
<p>B2: décrit un monde où l'accent est mis sur des solutions locales dans le sens de la viabilité économique, sociale et environnementale. La population mondiale s'accroît de manière continue, mais à un rythme plus faible que dans le canevas A2 ; il y a des niveaux intermédiaires de développement économique, et l'évolution technologique est moins rapide et plus diverse que dans les canevas B1 et A1. La prévision pour ce scénario est d'une augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère jusqu'à environ 620 ppm dans l'année 2100. Selon les modèles, cette augmentation serait accompagné d'une augmentation de la température moyenne du globe égale à 2.7°C (± 0.8 °C en fonction du modèle).</p>

Figure 26. Prévisions des concentrations des gaz à effet de serre et d'évolution des températures au XXI siècle selon les différents modèles climatiques utilisés (adapté du rapport de l'IPCC, 2001).



2.1.3. Prévisions pour le XXI^{ème} siècle

Pour réaliser les prévisions futures, l'IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change) (2001) avait proposé une gamme de scénarios d'émissions de gaz à effet de serre qui pourraient être utilisés par les modèles de circulation générale (GCM). Ces scénarios (SRES-Special Report on Emissions Scénarios) sont regroupés en familles de scénarios qui tiennent compte des différentes tendances socio-économiques prévues (démographiques, sociales, économiques et technologiques) (Tableau 21). Ainsi, le rapport de l'IPCC (2001) montre que les concentrations de CO₂ à la fin du siècle pourraient atteindre entre 450 et 1000 ppm, selon les politiques énergétiques des différents pays (représentées dans les SRES). Les différents GCM utilisés dans le rapport traduisent ces évolutions des gaz à effet de serre, par une augmentation de la température d'entre 1.5 et 6°C de 1990 à 2100 (l'ampleur de l'augmentation étant liée à nos capacités de régulation des émissions de gaz à effet de serre selon différents scénarios socio-économiques, et à l'incertitude des modèles climatiques) (Figure 26). Ce réchauffement sera encore plus rapide dans les surfaces continentales, particulièrement pour celles situées à haute latitude en saison froide. La répartition des pluies sera plus hétérogène : il est prévu une augmentation de la pluviométrie en Europe du Nord au printemps, à l'automne et à l'hiver (0 à 3% par décennie) et une diminution de la pluviométrie en été pour l'Europe du Sud et l'Afrique du Nord (-0.2 à -6% par décennie) (Seguin, 2006).

Le rapport de l'IPCC (2001) considère très probable (plus de 95%) l'augmentation des températures maximales, l'augmentation du nombre de jours chauds (température moyenne supérieure à 25°C), l'augmentation des températures minimales ainsi que la diminution du nombre de jours froids (de gelées).

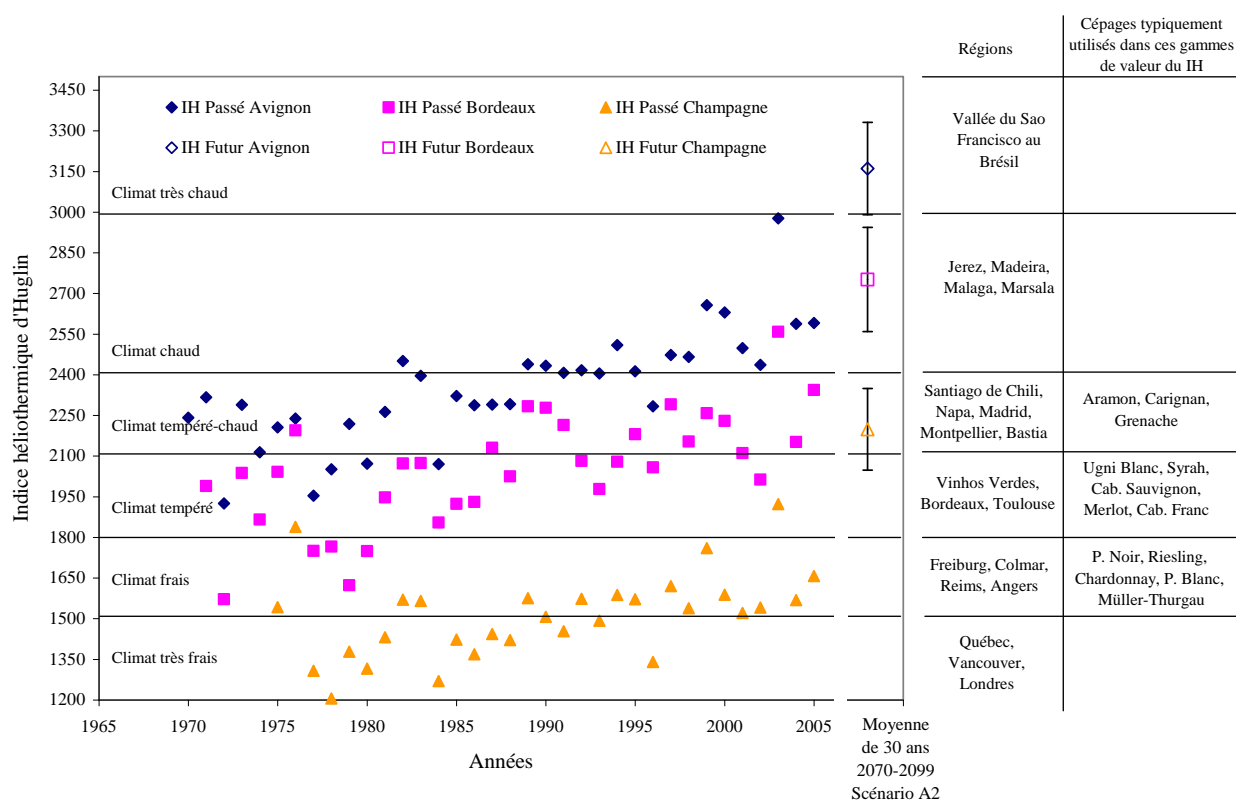
Il existe encore des incertitudes (probabilité supérieure à 66%) sur la diminution de l'amplitude thermique journalière, la fréquence des précipitations et leur intensité, l'augmentation des vagues de chaleur et la diminution des vagues de froid, l'augmentation de fortes pluies hivernales, ainsi que sur l'augmentation de la fréquence des sécheresses estivales dans les latitudes intermédiaires. A toutes ces modifications, il faudra ajouter entre autres, l'augmentation du niveau de la mer, la modification de la circulation thermohaline (couramment appelé courant du Gulf Stream), la diminution notable de la cryosphère, une augmentation de la radiation ultraviolette UV-B au niveau de la surface et une plus forte fréquence d'événements "El Niño" (IPCC, 2001).

Les perspectives d'évolution du climat, à cause de l'émission de gaz à effet de serre d'origine anthropique, ont des conséquences sur la croissance et la physiologie des espèces cultivées et donc sur la qualité et le rendement des récoltes (Harrison *et al.*, 1995 ; Downing *et al.*, 2000 ; IPCC 2001 ; Olesen et Bindi, 2002 ; Perarnaud *et al.*, 2005 ; EEA, 2004 ; Seguin *et al.*, 2005). C'est le cas de la vigne.

2.2. Le changement climatique et la vigne

La vigne a été amplement étudiée dans le cadre d'études de changement climatique. Ces études peuvent être séparées en deux groupes : d'une part, des études sur les impacts observés ces dernières années et qui sont liés à la modification du climat ; et d'autre part, des études qui, par le biais de l'expérimentation (mimant les conditions futures) ou de la modélisation, essaient de déterminer les conditions de production de cette culture dans le futur.

Figure 27. Evolution de l'indice héliothermique d'Huglin (IH) pour les vignobles de Côtes du Rhône, de Bordeaux et de Champagne dans le passé et dans le futur (scénario A2) (points vides avec écart type). A côté du graphique, nous avons décrit les différentes régions qui se trouvent actuellement dans chaque climat (toujours défini selon l'indice IH) et les cépages qui sont cultivés traditionnellement.



2.2.1. Les changements récents observés

- *Sur la phénologie*

La plupart des changements qui ont été observés ces dernières années concernent surtout l'évolution de la phénologie. Ainsi, plusieurs études sur les vignobles européens montrent un avancement généralisé des stades de floraison et de véraison en lien avec l'augmentation de la température (Jones et Davis, 2000 ; Duchêne et Schneider, 2005 ; Jones *et al.*, 2005b). Les mêmes tendances ont été observées pour la date de vendange au cours du siècle dernier, sans que cela puisse s'expliquer par une modification des pratiques culturales (Ganichot, 2002 ; Seguin et García de Cortázar, 2004). Il faut remarquer cependant l'hétérogénéité des résultats observés en ce qui concerne la date de débourrement : un léger avancement au nord et un possible retard au sud (Jones *et al.*, 2005b). Ceci pourrait s'expliquer par la capacité de la plante à satisfaire les besoins en froid nécessaires pour sortir de la période de dormance, plus problématique dans le sud. Plus le climat se réchauffe et les hivers sont tempérés, plus la période de dormance est longue (Jones, 2003 ; Garcia de Cortázar *et al.*, 2005).

- *Sur les classifications climatiques des vignobles et des cépages*

L'indice Héliothermique de Huglin (1978) a aussi été très utilisé pour caractériser ces changements. Cet indice est basé sur le cumul des températures actives pour la vigne (avril-septembre) et il tient compte de la durée du jour (Équation 20).

Équation 20

$$IH = \sum_{01/04}^{30/09} \frac{(T_{moy} - 10) + (T_{max} - 10)}{2} K$$

où T_{moy} est la température moyenne journalière, T_{max} est la température maximale et K est un coefficient qui dépend de la latitude.

A partir des valeurs de cet indice, Huglin (1978) propose une classification des zones climatiques viticoles et des cépages associés à chacune d'entre elles (Figure 27). Plusieurs travaux récents utilisant ces classifications ont montré une augmentation de la valeur de l'indice d'Huglin dans différentes régions d'Europe au cours de ces dernières années. Cela se traduit par un changement de zone climatique pour les différents vignobles et, par conséquent, des cépages traditionnellement présents dans ces zones (Seguin et Garcia de Cortázar, 2004 ; Duchêne, 2004 ; Jones *et al.*, 2005b) (Figure 27). Ces résultats remettent en cause la structure des vignobles telle qu'on la connaît actuellement (Schultz, 2000 ; Seguin et Garcia de Cortázar, 2004 ; Duchêne et Schneider, 2005 ; Jones *et al.*, 2005 a,b).

Parallèlement, Jones *et al.*, (2002, 2004a,b, 2005a) ont proposé une autre classification de la capacité thermique d'adaptation de plusieurs cépages, à partir de la température moyenne active pour la période avril-octobre dans les différents vignobles du monde où les cépages étaient présents (Figure 28). Selon cette classification le cépage Syrah aurait déjà dépassé ses limites d'adaptabilité dans la région des Côtes du Rhône (années 2003, 2004 et 2005) et le cépage Grenache s'en approcherait (Garcia de Cortázar, 2006). Cependant, les observations de terrain ne permettent pas de mettre en évidence des signes d'inadaptation.

- *Sur la vendange*

Concernant les caractéristiques de la vendange, plusieurs études ont montré une évolution de certaines composantes de la qualité traduite dans certains cas par une augmentation de la teneur en sucre, ou par une diminution de l'acidité, une augmentation des rendements, ainsi que une amélioration des conditions phytosanitaires (Jones et Davis, 2000 ; Nemani *et al.*, 2001 ; Caprio et Quamme, 2002 ; Duchêne et Schneider, 2005).

Figure 28. Classification de l'adaptabilité des cépages en fonction de la température moyenne du cycle de la vigne (Jones *et al.*, 2002, 2004a,b, 2005a). Le trait bleu est la température moyenne du cycle de la vigne dans la région du Côtes du Rhône dans la période 1967-1989. Le trait rouge est la température moyenne du cycle de la vigne dans la région du Côtes du Rhône dans la période 1990-2005.

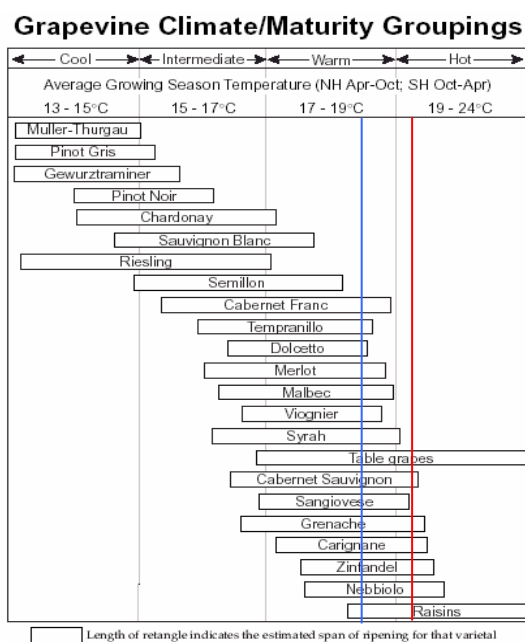
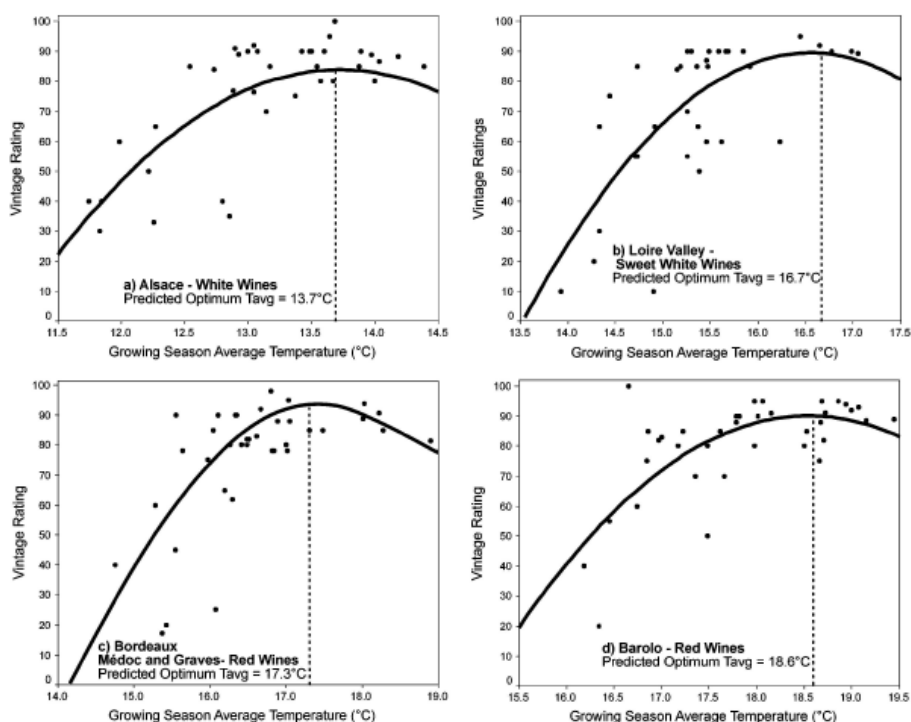


Figure 29. Relations entre la température moyenne de croissance de la vigne et les notes de dégustation de vins (Sotheby's) pour quatre régions du monde: a) vins blancs d'Alsace; b) vins moelleux du Val de Loire; c) vins rouges de Bordeaux (Medoc et Graves); d) vins rouges du Barolo. Le trait discontinue montre l'optimum de température pour produire les meilleurs vins (selon leur notes) dans chaque région (Jones *et al.*, 2005a).



Jones *et al.*, (2004b, 2005a) ont utilisé une approche plus originale mettant en relation la température moyenne pour la période avril-octobre et des notes de dégustation (Stevenson, 2001), dans plusieurs régions du globe. Ils obtiennent une régression non-linéaire par région et par type de vin, ce qui permet de définir les températures optimales (avec ces températures les vins obtiennent les meilleures notes de dégustation) de production des différents types de vins dans chacune de ces régions. Ils observent que dans de nombreuses régions, cet optimum de qualité a été atteint ces dernières années, et que dans certaines l'augmentation de la température se traduit par un dépassement de l'optimum et donc par des notes de dégustation moins bonnes (Figure 29).

En conclusion, tous ces résultats montrent un avancement des stades phénologiques, ainsi qu'une amélioration globale de la qualité telle qu'elle est perçue aujourd'hui, accompagnée dans certains cas d'une augmentation des rendements (tendance moins claire). Comme élément significatif de cette évolution, on remarque la (re)naissance récente des vignobles septentrionaux, comme les vignobles anglais (Subak et Lister, 1999 ; Chapman, 2004) et canadien (Caprio et Quamme, 2002), confortant les prévisions d'extension géographique des zones de culture de la vigne (Kenny et Harrison, 1992 ; Stock *et al.*, 2004).

Notons qu'il faut accorder une importance particulière à l'été 2003, caractérisé par un épisode exceptionnel d'environ 3 mois (juin à août) combinant des températures chaudes (supérieures à la normale de 3 à 5°C) et une période de forte sécheresse. Ceci a généré une avancée exceptionnelle de la date de vendange (la plus précoce depuis 1370 (Chuine *et al.*, 2004)), avec des degrés très élevés d'alcool et des acidités faibles (INRA, 2004 ; Seguin et Garcia de Cortázar, 2004). La qualité globale de chaque terroir a été fortement modifiée, donnant naissance à des vins atypiques (INRA, 2004). L'analyse de cette année peut apporter des informations intéressantes pour l'interprétation des résultats du changement climatique, car les prévisions futures montrent que l'année 2003 pourrait devenir une année "typique" dans le futur (Seguin *et al.*, 2004).

2.2.2. Prévisions d'impacts pour le XXI^{ème} siècle

Les études d'impact du changement climatique sur la vigne peuvent être divisées de deux façons. D'une part à partir d'expérimentations dans lesquelles ont été reproduites partiellement les conditions environnementales du futur, et d'autre part à partir de simulations en utilisant les scénarios climatiques prévus pour la fin du siècle.

- *A partir d'expérimentations*

Bindi *et al.*, (2000a, 2001a, b) ont mis en place une expérimentation pendant deux ans (1996-1997) pour étudier les impacts de l'augmentation de concentration de CO₂ (550ppm et 700ppm) sur la vigne. Les effets observés sont ceux généralement attendus sur les systèmes à couverts végétaux pérennes (Seguin et Garcia de Cortázar, 2004). La stimulation de la photosynthèse liée à cette augmentation, entraîne une augmentation de la biomasse totale d'environ 45-50%, ainsi que de la biomasse des fruits d'environ 40-45%. Cependant, il n'apparaît pas de différence significative d'augmentation de biomasse entre les deux concentrations testées. Les auteurs expliquent cela par un possible blocage de la demande à cause d'un effet de saturation des puits. D'autre part, ils n'ont pas observé d'effet sur la qualité finale (ici définie seulement par le sucre et l'acidité totale), bien que son évolution durant la période véraison-récolte montre des différences selon les concentrations de CO₂. Par contre, dans ce cas, les auteurs n'ont pas introduit une augmentation de la température, ce qui pourrait modifier certains résultats.

Tableau 22. Quelques conséquences connues de la radiation UVB et ses effets éventuels sur la production du raisin (d'après Schultz, 2000).

Conséquences des UV-B	Effets éventuels sur la production du raisin
• Activation de gènes de la voie phytopropanoïde	accumulation de flavonoïdes et anthocyanines (formation de la couleur, composition du vin)
• Inactivation (endommagement) du photosystème II et des enzymes photosynthétiques	diminution de la photosynthèse
• Concentrations réduites en chlorophylle et caroténoïdes	diminution de la photosynthèse, composés aromatiques modifiés, équilibre énergétique des feuilles et des baies?
• Conséquences sur le métabolisme de l'azote (par l'apport de carbone ou les conséquences directes sur les enzymes clés)	réduction de la concentration en acides aminés (métabolisme de la levure, cinétique de la fermentation, formation d'alcools supérieurs, composés aromatiques secondaires)
• Feuilles plus épaisses, cire	plus de résistance aux maladies
• Photo-oxydation de l'acide indole-acétique (AIA, auxine) Absorption des UVB par le tryptophane	formation éventuelle de <i>o</i> -aminoacétophénone (mauvais goût dans le vin blanc)
• Augmentation des teneurs en acide ascorbique et en glutathione suite à la formation de radicaux libres	photoprotection, métabolisme du soufre, induction d'activités enzymatiques (importantes pour le métabolisme de la levure)
• Floraison et phénologie	peuvent être touchés pour certains cépages
• Modifications de la microflore et de la faune du sol	disponibilité des éléments nutritifs

Par ailleurs, Schultz (2000) montre des résultats obtenus sur le cépage Riesling à Montpellier, pour lequel une augmentation de la concentration de CO₂ (605ppm) induit une augmentation de la photosynthèse de 35%, sans influencer la transpiration. Ceci confirme l'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau, qui devrait être augmentée de l'ordre de 20%, suite à l'augmentation de la résistance stomatique (Drake *et al.*, 1997). D'autre part, le même auteur montre que l'augmentation de la radiation ultraviolette (UV-B) entraînerait des modifications de certains composants du raisin (Tableau 22).

- *A partir de la modélisation de la croissance et du développement*

Le couplage des modèles agronomiques avec des données issues des modèles de circulation générale a permis de réaliser des études d'impacts du changement climatique sur la vigne (Olesen et Bindi, 2002).

Ainsi Bindi *et al.*, (1997a et b, 2000a et b) utilisent leur modèle pour étudier l'évolution de la croissance et du développement de la vigne, en appliquant plusieurs scénarios climatiques sur différentes régions d'Europe. Ils observent un avancement des stades phénologiques, mais ils ne montrent pas une augmentation significative du rendement et de la qualité (cette qualité étant simulée par une relation empirique entre le rayonnement et la teneur en sucre, et l'acidité). Néanmoins, les résultats obtenus montrent une plus forte variabilité, surtout en ce qui concerne la qualité, ce qui peut se traduire par des risques plus élevés pour les producteurs (Olesen et Bindi, 2002 ; Stock *et al.*, 2005). L'effet positif de l'augmentation du CO₂ pourrait être plus important que l'effet négatif du réchauffement, sans pour autant avoir d'effet sur la qualité (d'après les données expérimentales de Bindi *et al.*, 2001b). Il faut cependant rappeler que ce modèle utilise des relations simplifiées entre certaines variables de la croissance et des variables environnementales, sans tenir compte des modifications d'itinéraire technique, ni du bilan hydrique et azoté de la plante et du sol.

D'autre part, García de Cortázar *et al.*, (2004) ont proposé une évaluation préliminaire des impacts dans les régions de Champagne et Côtes du Rhône en utilisant une version ancienne du modèle STICS-vigne (Brisson *et al.*, 2002b). Leurs résultats montrent également un net avancement des stades phénologiques, ainsi qu'un raccourcissement du cycle. Ils montrent cependant une différence de tendances entre les régions en terme de production et de rendements. Dans la région champenoise, la tendance serait légèrement à la hausse (par une amélioration des conditions climatiques), tandis que dans la région des Côtes du Rhône cette tendance est inversée par le possible dépassement d'un optimum de croissance. Leurs résultats montrent une capacité plus élevée de la vigne pour atteindre les stades de maturité souhaités (en terme de degré alcoolique – concentration en sucre).

En ce qui concerne uniquement la modélisation de la phénologie de la vigne, les résultats obtenus dans différentes études confirment ceux présentés ci-dessus (Bindi *et al.*, 2000c ; Lebon, 2002 ; Stock *et al.*, 2005 ; Jones, 2005 ; Garcia de Cortázar *et al.*, 2005).

- *A partir de la modélisation du bilan hydrique*

Schultz et Lebon (2005) étudient les impacts du changement climatique sur l'état hydrique de la plante en utilisant le modèle du bilan hydrique développé par Lebon *et al.*, (2003). Ils évaluent l'effet des différents niveaux d'évapotranspiration (sans modifier d'autres variables climatiques) sur la réserve en eau transpirable du sol (TSW), sur le potentiel foliaire de base et sur le maximum de photosynthèse. Les auteurs montrent que dans tous les cas apparaît une accentuation des niveaux de stress. Leurs conclusions soulèvent des questions relatives à la modification de l'efficacité d'utilisation de l'eau et de la photosynthèse dans les nouvelles conditions de concentration de CO₂ et de température du futur.

- *A partir de la modélisation d'indices climatiques viticoles*

Des études récentes ont étudié l'évolution d'indices climatiques viticoles à grande échelle dans les conditions futures, grâce aux systèmes d'information géographique (SIG). Ainsi, une étude menée en Catalogne (Espagne) (Sort, 2006) montre un déplacement futur des zones climatiques et propose par conséquent un déplacement des zones de plantation vers les zones de montagne (Pyrénées) ainsi que l'introduction de l'irrigation. D'autre part, White *et al.*, (2006) montrent que la surface de production de vins de qualité aux Etats-Unis pourrait diminuer de 81%.

- *A partir de la modélisation des maladies de la vigne*

D'autres travaux prévoient une augmentation des problèmes phytosanitaires (Mildieu, Oidium) (Stock *et al.*, 2005 ; Salinari *et al.*, 2006), accompagnée d'une augmentation conséquente du nombre de traitements (ayant un impact économique dans la production).

2.2.3. Conclusion partielle

Tous ces travaux conduisent à des questionnements sur les structures des vignobles connus actuellement (Seguin et García de Cortázar, 2004 ; Jones, 2005a ; Agenis-Nevers, 2006). Une augmentation de la température moyenne de 1°C correspondrait à un déplacement relatif du climat de 180 km vers le Nord (Moisselin *et al.*, 2002). Cette augmentation de la température est prévue entre les années 2035 et 2050 (selon les scénarios utilisés) (IPCC, 2001).

Par contre les études réalisées jusqu'à maintenant présentent quelques limites. D'une part, les modèles agronomiques utilisés pour la vigne, soit ne prenaient pas en compte les modifications du bilan hydrique (cas du modèle de Bindi), soit étaient issus d'une première version du modèle STICS-vigne encore incomplète (Brisson *et al.*, 2002b). D'autre part, les travaux basés sur l'évolution des différents indices climatiques (en majorité thermiques) permettent d'avoir un aperçu général des modifications attendues dans le futur, mais ne tiennent pas compte du fonctionnement de la plante et de sa relation avec le milieu.

A partir de ces constatations, il est donc important de mettre en relation l'ensemble des réactions biophysiques des éléments du système sol-climat-cépage-techniques culturales et la modification des facteurs du climat ainsi que l'élévation du CO₂. Compte tenu de la complexité des modifications, induites par le changement climatique dans les interactions au sein du système viticole, il semble pertinent d'utiliser un modèle de culture mécaniste qui en tienne compte.

Le modèle STICS adapté à la vigne, s'avère être un outil capable de tenir compte des interactions à l'échelle de la parcelle (et donc du système viticole) et pouvant être forcé par des variables d'entrée provenant des scénarios climatiques produits par les modèles de circulation générale.

3. Données, méthodes utilisés et description du protocole de simulation

Pour réaliser notre étude, nous avons couplé le modèle STICS, avec des données simulées du modèle de circulation générale (CGM) ARPEGE-Climat.

Dans un premier temps, nous décrirons les données météorologiques utilisées, ainsi que la méthodologie mise en place pour leur application. Ensuite, nous montrerons les différentes conditions

Figure 30. Description de la distribution de la résolution dans le modèle ARPEGE (image issue de Météo-France).

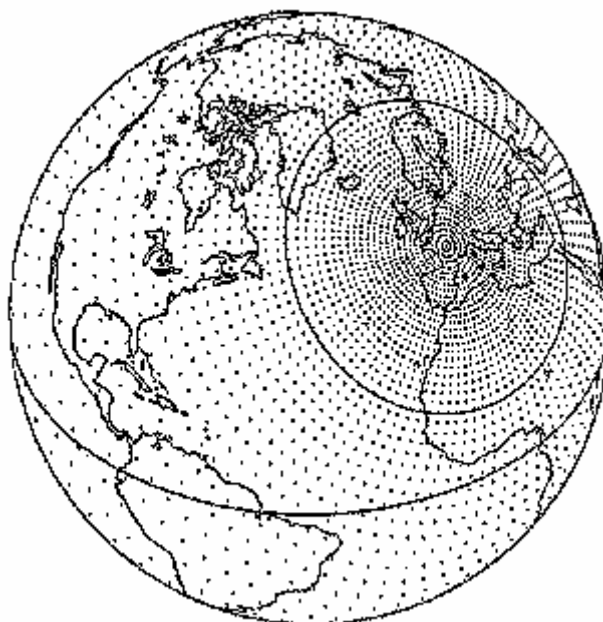


Tableau 23. Estimations des changements climatiques moyennées sur la France pour la période 2070-2099 et la période de référence 1960-1989 (simulation climatiques Météo-France et Institut Pierre-Simon Laplace).

Scénario	Concentration atmosphérique en CO ₂ ppm	Températures (°C)			Précipitations (%)		
		Année	Hiver	Eté	Année	Hiver	Eté
B2	500 à 600	2 à 2.5	1.5 à 2	2.5 à 3.5	-5 à 0	0 à +10	-25 à -5
A2	650 à 800	3 à 3.5	2.5 à 3	4 à 5	-10 à 0	+5 à +20	-35 à -20

techniques et pédologiques retenues dans les différentes régions viticoles. Puis nous mettrons en lumière les différents formalismes du modèle qui lui permettent de prendre en compte les effets du changement climatique. Enfin, nous décrirons la méthodologie qui sera utilisée par la suite pour l'interprétation des différents résultats.

3.1. Données météorologiques

3.1.1. Le modèle ARPEGE-Climat

Les données météorologiques sont issues du modèle de circulation générale (GCM) ARPEGE-Climat (Déqué *et al.*, 1998, Gibelin et Déqué, 2003) développé pour l'étude des changements climatiques anthropiques et la prévision saisonnière. ARPEGE-Climat est dérivé du modèle ARPEGE-IFS qui a été développé par Météo-France et le Centre Européen de Prévision Météorologique à moyen Terme (CEPMMT) et qui sert à la prévision météorologique opérationnelle à court et moyen terme (Déqué *et al.*, 1994). La principale caractéristique du modèle ARPEGE est sa résolution horizontale variable (mode étiré) : l'atmosphère est divisée en petites "boîtes" élémentaires dont la dimension horizontale est minimale sur la France, pour croître progressivement jusqu'aux antipodes où elle est maximale (50 km dans la Méditerranée et 500 km dans le sud du Pacifique) (Figure 30). De cette façon le modèle peut réaliser des prévisions à échelle fine sur la France tout en décrivant avec une précision suffisante les grands phénomènes à l'échelle planétaire, sans nécessiter de couplage avec d'autres modèles, ce qui demanderait beaucoup de temps de calcul (Gibelin et Déqué, 2001 a et b). Plusieurs travaux ont montré la capacité du modèle ARPEGE-Climat à reproduire les principales caractéristiques du climat européen actuel (Gibelin et Déqué, 2001 a et b) et confirment également son intérêt pour l'étude d'impacts du changement climatique à l'échelle régionale (Gibelin et Déqué, 2003 ; Déqué *et al.*, 2005).

Les intérêts d'utiliser le modèle ARPEGE-Climat sont les suivantes :

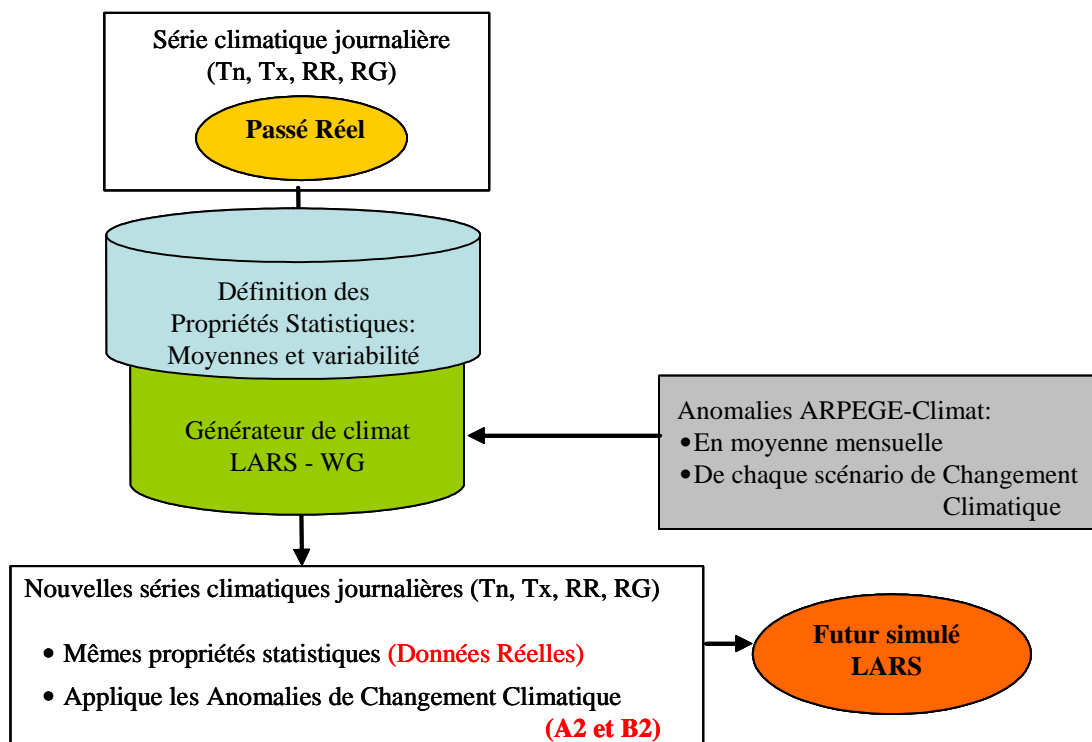
- ❖ La haute résolution de la grille de travail du modèle dans la zone d'intérêt de l'étude (50km x 50km), ce qui permet de travailler à l'échelle des régions viticoles.
- ❖ La disponibilité des valeurs journalières des variables nécessaires pour réaliser des simulations avec le modèle STICS (température minimale et maximale, pluviométrie, humidité, rayonnement global et vent).
- ❖ La disponibilité des dernières simulations réalisées par le CNRM pour les deux scénarios de référence A2 et B2.

3.1.2. Les données simulées

Les données utilisées sont issues de la simulation réalisée par le modèle ARPEGE-Climat sur les scénarios futurs A2 et B2 (les seuls à avoir été utilisés pour les simulations climatiques dans le modèle ARPEGE-Climat).

Comme nous pouvons le voir dans le Tableau 23, les prévisions de ce modèle pour les différentes régions de France sont une augmentation de la température moyenne annuelle, avec une augmentation de la pluviométrie en hiver et une diminution en été (plus accentuées dans le scénario A2).

Figure 31. Schéma qui décrit la méthode des anomalies appliquées dans un générateur climatique LARS-WG. T_n est la température minimale; T_x est la température maximale; RR est la pluviométrie; et RG est le rayonnement global.



D'autre part, le modèle simule une série de données correspondant à la période passée 1960-1999 (appelée série Contrôle). Les années 1960-1989 sont considérées comme préalables au changement climatique, et ce n'est qu'à partir de 1990 que l'on prend en compte l'augmentation exponentielle de la concentration de CO₂ (données Météo-France).

Cette série Contrôle est utilisée pour être comparée avec des données réelles mesurées sur la même période et ainsi valider le modèle (Déqué *et al.*, 1998 ; Gibelin et Déqué, 2001 a et b ; Gibelin et Déqué, 2003 ; Déqué *et al.*, 2005).

3.1.3. Méthodes d'utilisation des données climatiques simulées par les GCM dans les modèles de cultures dans le cadre d'études d'impacts

Gamboa (2005) propose 4 méthodes d'application des données de GCM dans les études d'impacts. :

- ❖ *La méthode directe* : qui est basée sur l'utilisation des données climatiques directement comme entrée du modèle. Les données de la série Contrôle sont préalablement comparées par une analyse statistique avec des données réelles mesurées, en sorte de validation des séries futures. Gamboa (2005) montre de fortes différences entre les données Contrôle et les données réelles. Parallèlement, García de Cortázar *et al.*, (2005) dans un travail sur la simulation de la date du débourrement, montrent de fortes différences entre les résultats issus des simulations avec les données de la série Contrôle et des données climatiques réelles de la même région.
- ❖ *La méthode analogique* : qui essaie d'augmenter les similitudes entre les données réelles du passé et le scénario de Contrôle. Pour cela, on compare les données de la série Contrôle avec des données réelles dans un même point et on regarde si elles présentent des gammes de valeurs similaires (les extrêmes étant éliminés). Dans ce cas, on obtient de nouvelles séries de données simulées qui représentent mieux la réalité. Cependant, Gamboa (2005) montre que dans la plupart de cas il est très difficile d'obtenir des séries de données suffisamment longues pour pouvoir être utilisées dans d'études d'impact.
- ❖ *La méthode des anomalies appliquées dans un générateur climatique* : cette méthode calcule des anomalies mensuelles pour chaque variable climatique, comme le rapport (pour la pluie) ou la différence (température et humidité) entre le climat mensuel moyen simulé sous les effets du changement climatique et le climat de la série Contrôle. Ensuite, elles sont appliquées sur la distribution statistique des données réelles physiques (les variables météorologiques) : ce sont les valeurs moyennes ainsi que leurs variabilités qui peuvent être modifiées. Pour tester cette méthode, nous pouvons utiliser de générateurs climatiques (par exemple LARS-WG (Semenov et Barrow, 1998)). Ce type de modèles sont capables de prendre en compte les modifications sur les moyennes et les écart-types des variables climatiques observées (voir schéma de la Figure 31). La fiabilité des résultats est déterminée à partir des tests statistiques (Student et Fischer). Par contre, nous ne pouvons pas utiliser cette méthodologie, car le générateur climatique ne permet pas de simuler les valeurs de l'humidité et du vent (nécessaires dans le modèle STICS pour réaliser les simulations).
- ❖ *La méthode des anomalies appliquées directement* : cette méthode est aussi basée sur un calcul des anomalies mensuelles, lesquelles sont calculées de la même façon que dans la méthode précédente. Par contre, ces anomalies mensuelles sont appliquées aux données réelles. Cette méthode présente l'inconvénient d'altérer la cohérence physique entre les

Tableau 24. Localisation et origine des différentes séries de données utilisées pour les séries climatiques Contrôle et localisation des points de simulation du modèle ARPEGE-Climat, correspondants aux régions de l'étude.

Région	Données Contrôle			Données ARPEGE - Climat	
	Origine des données	Station Météorologique	Position	Point Grille ARPEGE -Climat	Position
Côtes du Rhône	INRA	Avignon	43°55', 4°50'	46	43°51', 5°00'
Languedoc	INRA	Montpellier	43°21', 3°31'	63	43°31', 3°58'
Bordeaux	INRA	Bordeaux	44°47', 0°34'	251	44°52', 0°46'
Cognac	Météo-France	Cognac	45°41', 0°19'	284	45°52', 0°56'
Bourgogne	INRA	Dijon	47°19', 5°02'	148	47°23', 4°52'
Val de Loire	INRA	Montreuil Bellay	47°7', 0°07'	306	47°29', 0°25'
Champagne	CIVC	Reims	49°3', 3°57'	238	48°59', 4°08'

Figure 32. Description des anomalies pour les différentes régions de l'étude. Pour les températures les valeurs sont exprimées en degrés (°C) et le point (0,0) représente l'état actuelle. Valeurs calculées à partir des données simulées pour les scénarios Contrôle, A2 et B2 issus du modèle ARPEGE-Climat (Météo France).

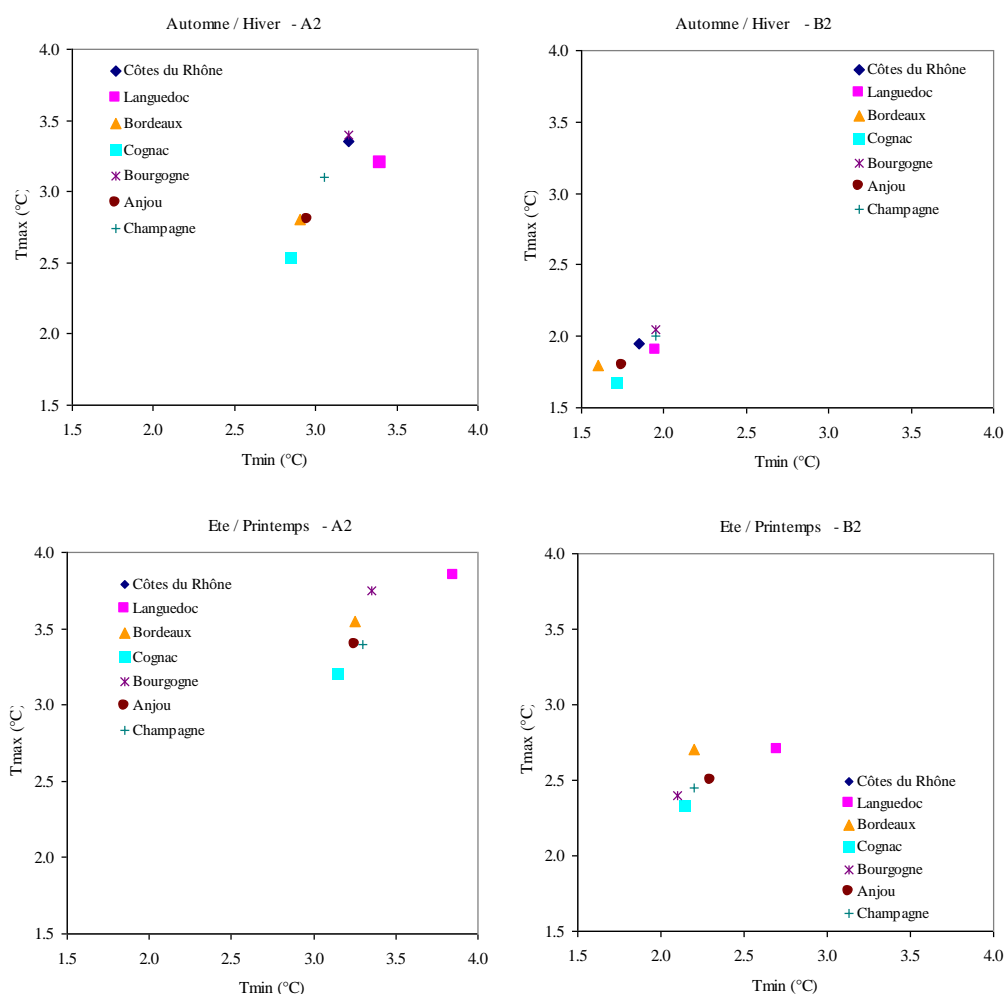


Figure 33. Description des anomalies pour les différentes régions de l'étude. La pluie est représentée en rapport (%) d'augmentation ou de diminution par rapport au 0 (état actuel). Valeurs calculées à partir des données simulées pour les scénarios Contrôle, A2 et B2 issus du modèle ARPEGE-Climat (Météo France).

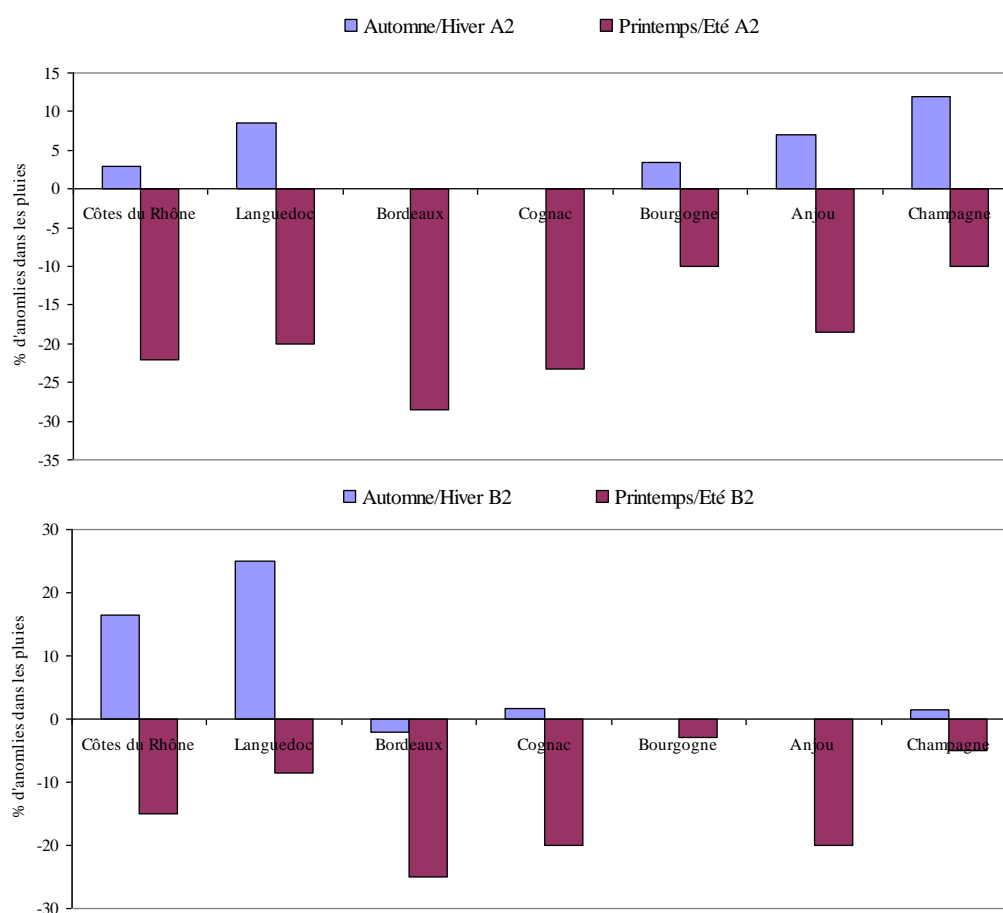


Tableau 25. Exemples de pratiques proposés pour diminuer les impacts du changement climatique sur la vigne, selon les prévisions actuelles pour le climat futur (adapté d'Agénis-Nevers, 2006).

- Protection du gel par des systèmes chauffants pendant les périodes critiques de la croissance (câbles électriques).
- Vignes à palissage haut : le rognage haut crée des zones d'ombre sur les jeunes grappes et empêche leur dessèchement (échaudage)
- Enherbage des sols nus : la présence d'une culture associée pourrait réduire l'évapotranspiration.
- Mise en place de mulchs : ceci permet une protection thermique et une meilleure utilisation de l'eau
- Irrigation : systèmes économiques comme le goutte à goutte.
- Traitements à la fraîche (matin/soir), pour éviter une dégradation rapide des produits phytosanitaires sous l'effet du rayonnement.
- Enracinement plus profond des pieds.
- Augmentation de la densité de plantation, de façon à protéger les grappes du rayonnement.

Tableau 26. Description du plan général des simulations utilisé pour étudier les impacts du changement climatique. Chacune de combinaisons de densité et de hauteur du feuillage son nommées: Structure 1: 3333 ceps/ha avec 1.5m; Structure 2: 5000 ceps/ha avec 1.3m; Structure 2: 9090 ceps/ha avec 0.9m; Structure 2: 3333 ceps/ha avec 1.0m.

Régions	Cépages	Sols	Densités et hauteur du feuillage	Eclaircissage	Irrigation	Paillage
Côtes du Rhône	Grenache, Syrah	2	3333 ceps/ha avec 1.5m (structure 1)			
Montpellier	Grenache, Syrah	2				
Bordeaux	Merlot, Syrah	2	5000 ceps/ha avec 1.3m (structure 2)	Non	Non	Non
Cognac	Ugni Blanc, Syrah	1	9090 ceps/ha avec 0.9m (structure 3)	ou	ou	ou
Bourgogne	Pinot Noir, Syrah	1		Oui*	Oui	Oui
Anjou	Cab Franc, Syrah	2	3333 ceps/ha avec 1.0m (structure 4)			
Champagne	Chardonnay, Syrah	1				

* Dans le cas de l'éclaircissage, s'il est réalisé, on élimine la moitié des grappes.

variables climatiques. Pour la pluviométrie, l'anomalie agit seulement sur la quantité, et non sur la distribution et le nombre de jours de pluie (on conserve la variabilité intra-mensuelle de la série réelle du passé). Cependant, elle permet d'utiliser toutes les données climatiques simulées, à condition d'avoir les séries réelles qui correspondent à la même période.

Nous allons utiliser cette dernière méthode qui a déjà été utilisée avec succès dans plusieurs études d'impacts (Lebonvallet, 2002 ; Leblois, 2004 ; Ducharne *et al.*, 2004 ; Gamboa, 2005 ; Moulin, 2006 ; Echeverria, 2006).

3.1.4. Séries de données appliquées dans cette étude

Pour utiliser la méthodologie des anomalies directes, nous avons récupéré des données réelles issues d'une station météorologiques de chaque région viticole, ainsi que les données des séries Contrôle et des scénarios climatiques A2 et B2 simulés par le par le modèle ARPEGE-Climat correspondant à la même position géographique (Tableau 24).

Les données du modèle ARPEGE-Climat correspondent à la période 1960-1999 pour la série Contrôle et à la période 2070-2099 pour les scénarios futurs. Les données des séries réelles correspondent à la période 1970-2000, car elle nous permet de comparer les situations prévues pour le futur avec des données plus actuelles (la période 1960-1989 commençant à être trop ancienne) et car dans certaines régions il n'était pas possible d'obtenir toutes les données des variables climatiques pour les années les plus anciennes (notamment les variables caractérisant le vent et l'humidité).

Comme nous l'avons indiqué auparavant, le calcul des anomalies a été réalisé mensuellement pour chacune des variables entre les données des scénarios futurs (A2 et B2) et les données du scénario Contrôle (valeur des anomalies dans l'Annexe V). Les Figure 32 et Figure 33 montrent graphiquement les principales tendances pour la pluie et les températures, pour chacune des régions de l'étude. En règle générale, on observe dans tous les sites les mêmes augmentations de températures minimales et maximales, plus ou moins accentuées selon le scénario, la saison et la région. En revanche, l'évolution des pluies est plus variable : une diminution est observée durant l'été dans toutes les régions, mais cette évolution est dépendante de la région en ce qui concerne les autres saisons.

Les séries utilisées sont d'une part, la série des données réelles disponibles dans chacune des régions (à partir de maintenant notre série Contrôle) et d'autre part, les nouvelles séries issues de l'application des anomalies calculées pour les scénarios A2 et B2 sur les données réelles (séries appelées A2 et B2 respectivement).

3.2. Choix de structures de plantation et de pratiques techniques pour réaliser les simulations

L'étude des impacts du changement climatique doit être réalisée pour chaque région séparément, car chacune présente différentes configurations de plantations, de cépages et de qualité recherchée à la vendange. Pour cela, nous avons proposé une série de conditions techniques et de structures de plantation qui nous permettent de décrire la structure actuelle du vignoble, mais aussi de tester de nouvelles structures et leur impact sur la production et la qualité. Ces conditions sont semblables à celles proposées dans le rapport de l'ONERC sur les impacts du changement climatique sur les activités viti-vinicoles (Agenis-Nevers, 2006) (Tableau 25). En revanche, certaines de ces

Tableau 27. Valeurs de paramètres sol utilisés dans le modèle STICS pour réaliser les simulations qui vont servir à l'étude d'impacts du changement climatique.

		Données sol										
		Côtes du rhône		Languedoc		Bordeaux		Cognac	Bourgogne	Anjou		Champagne
paramètre	dimension	Serres	Chateauneuf de Gadagne	Sauteyrargues	Bolchet	Argiles	Graves	Juillac	Masannay	SNB1	Montreuil Bellay	Plumecoq
		fRU	gRU	fRU	gRU	Argiles	Graves			fRU	gRU	
Reserve maximale disponible	mm	120.00	232.00	97.00	133.00	183.00	175.00	122.00	110.00	50.00	176.00	144.00
argi	%	21.20	40.3	33.5	18	20.7	19.6	26.90	35	4.5	35.9	38
Norg	%	0.07	0.17	0.12	0.09	0.04	0.05	0.13	0.1	0.041	0.13	0.18
proffumc	cm	30	30	30	30	30	30	30.00	30	30	30	30
calc	%	13.00	2.5	15.9	15	2.4	6.3	22.05	20	0	0.58	57.3
pH	SD	7.95	8.2	8.1	7	8.22	8.3	8.30	8	7.9	8.075	8.14
albedo	SD	0.30	0.28	0.22	0.21	0.22	0.18	0.18	0.25	0.21	0.13	0.31
q0	mm	1.00	3.00	10.5	8.1	0	0	0.00	7.9	4	0	0
obstarac	cm	190.4	300	189.0	226.4	200.0	200.0	110.00	148.0	150	250.0	80.0
epc												
H1	cm	10	10	10	10	10	53	35	10	45	60	10
H2	cm	105	40	110	50	60	127	40	40	15	25	40
H3	cm	85	20	80	190	130	20	35	150	35	165	30
H4	cm	0	30	0	0	0	0	0	0	55	0	0
H5	cm	0	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HCCF												
H1	geau/gsol	20.00	31.9	21.9	23.80	19.1	16.7	29.9	33	6.98	26.71	25.3
H2	geau/gsol	17.12	31.9	23.3	23.94	16.2	19.4	30.4	29.15	6.98	24.8	22.9
H3	geau/gsol	20.41	34.2	31.2	21.95	24.2	15.9	26.6	28.21	5.43	23.8	25.8
H4	geau/gsol	0	25.3	0	0	0	0	0	0	6.98	0	0
H5	geau/gsol	0	24.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HMINF												
H1	geau/gsol	9.40	20.5	10.4	8.10	5.7	8.6	15.4	19	2.72	18.54	3.2
H2	geau/gsol	6.00	20.5	13.8	7.56	7.5	9.9	17.9	19	2.72	22.81	9.7
H3	geau/gsol	3.70	24.4	15.3	6.90	14.9	10.1	13.8	13	2.02	18.7	17.7
H4	geau/gsol	0	16	0	0	0	0	0	0	2.72	0	0
H5	geau/gsol	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DAF												
H1	g/cm3	1.45	1.50	1.45	1.46	1.45	1.50	1.50	1.45	1.29	1.40	1.50
H2	g/cm3	1.42	1.45	1.43	1.42	1.45	1.50	1.43	1.40	1.29	1.29	1.45
H3	g/cm3	1.45	1.45	1.45	1.40	1.19	1.46	1.43	1.40	1.57	1.40	1.45
H4	g/cm3	0.00	1.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.29	0.00	0.00
H5	g/cm4	0.00	1.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
cailloux												
H1	m3/m3	49.40	60.00	48.20	4.50	13.00	17.90	20.00	6.10	5.90	6.40	0.00
H2	m3/m3	70.10	60.00	71.50	41.10	13.00	19.00	75.00	9.50	26.80	25.60	0.00
H3	m3/m3	66.90	55.00	77.90	85.30	4.00	55.00	95.00	84.20	23.70	0.00	0.00
H4	m3/m3	0.00	50.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	54.40	0.00	0.00
H5	m3/m4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

propositions ne correspondent pas à la réalité observée sur le terrain ou à une évolution logique des techniques culturales dans le futur selon certains experts (*Hans R. Schultz et Kees Van Leeuwen, communication personnelle*).

Pour mettre en place le protocole de simulations, nous avons tenu compte de la structure actuelle du vignoble dans chacune des régions de l'étude (Tableau 26). Nous avons choisi **2 cépages par région** : un cépage typique de la région et un cépage "exotique", le cépage Syrah. Pour les régions du sud (Languedoc et Avignon), nous avons gardé les deux cépages couramment utilisés, Grenache et Syrah, car nous n'avions pas de cépages plus méridionaux paramétrés pour le modèle STICS-vigne (i.e. Tempranillo).

Lorsque cela était possible, nous avons choisi **2 sols** : un sol à faible réserve utile (fRU) et un sol à grande réserve utile (gRU). Ils ont été choisis par expertise dans les bases de données utilisées pour le paramétrage et la validation du modèle (données de la BDE et de la BDH). En revanche, les niveaux de RU retenus pour les deux sols choisis, ne peuvent pas être comparés d'une région à une autre, en raison des différences géomorphologiques entre les vignobles (Tableau 27). Dans la région de Bordeaux, il n'y avait pas beaucoup de différences entre les valeurs des RU et seule la texture diffère. Dans les régions de Champagne, Cognac et Bourgogne, nous n'avons retenu qu'un seul type de sol très représentatif de la région ou de la disponibilité dans nos bases de données (cas de la Bourgogne)..

Nous avons introduit **plusieurs densités de plantation**. Dans chaque région il existe un certain nombre des structures typiques définies par une densité de plantation liée à une hauteur du feuillage. Dans notre cas, il s'avérait trop compliqué de garder toutes les densités de plantation existantes sachant qu'elles peuvent varier de 2700 ceps/ha (Cognac), à environ 10000 ceps/ha (Bourgogne, Champagne). Afin de limiter les calculs, et ainsi simplifier l'analyse des résultats, nous avons retenu 4 structures de plantation : 3 structures (3333 ceps/ha – 1.5 m, 5000 ceps/ha – 1.3 m et 9090 ceps/ha – 0.9 m), auxquelles nous avons appliqué le rapport "hauteur du feuillage/distance entre rangs" égal à une valeur conseillée comprise entre 0.5 – 0.8 (Cahurel *et al.*, 2005) ; et une structure à faible densité avec une basse hauteur du feuillage (3333 ceps/ha – 1.0 m), pour favoriser une possible économie d'eau par réduction de la transpiration de la plante. La distance entre les ceps sur le rang a été fixée à 1m et la hauteur de la base du feuillage a été adaptée en fonction du type de taille appliqué dans la région (soit cordon royat, soit guyot simple ou double, soit chablis) (Tableau 28 de la page suivante).

Nous avons voulu observer les possibles effets du changement climatique sur l'application de certaines pratiques culturales susceptibles d'avoir un impact sur la croissance de la vigne:

- ❖ **L'effet de l'éclaircissage**. Nous avons comparé l'impact d'un éclaircissage de la moitié des grappes à l'absence d'éclaircissage, afin d'observer la modification du rapport source-puits (et donc de la compétition entre les feuilles et les fruits). Le nombre de grappes maximales a été forcé en fonction des types de tailles pratiquées dans chaque région et du nombre de bourgeons couramment laissés à la taille (Tableau 28 de la page suivante). La date d'éclaircissage a été estimée, en prenant en compte l'accélération de la phénologie, selon les prévisions du futur (Lebon, 2002; Garcia de Cortazar *et al.*, 2004; Gamboa, 2005).
- ❖ **L'introduction d'une irrigation automatique** dans toutes les régions. Les prévisions futures montrent en effet une diminution des précipitations pendant la période de croissance (surtout l'été), et on considère que l'introduction de l'irrigation pourrait être nécessaire dans certains cas à l'avenir. L'irrigation automatique est pilotée dans le modèle à partir de l'indice de stress hydrique de la plante SWFAC (l'indice de stress stomatique). Nous avons défini un niveau de

Tableau 28. Valeurs de différents paramètres considérés dans la structure de plantation: nombre de grappes maximale, hauteur de la base du feuillage, degré d'alcool utilisé comme critère pour déclancher la récolte.

	Type de structure	Grenache	Syrah	Pinot Noir	Chardonnay	Cabernet Franc	Ugni Blanc	Merlot
Hauteur Base Feuillage	1	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
	2	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
	3	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
	4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3

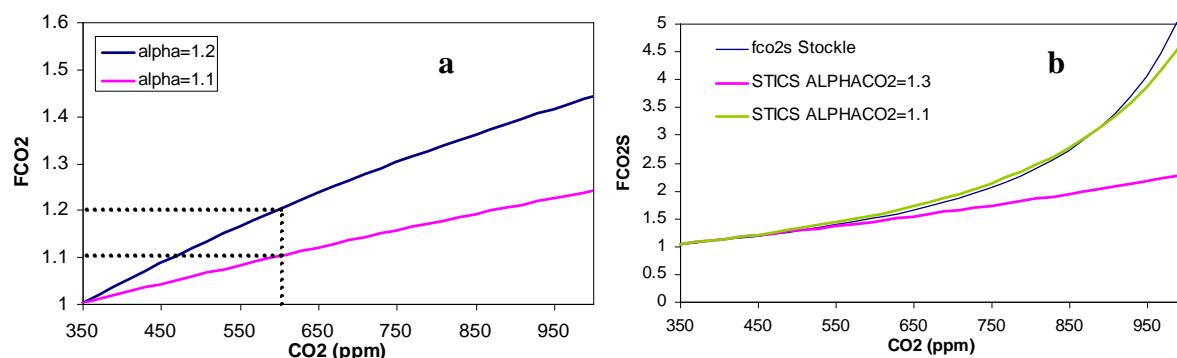
Teneur en sucre recherchée à la récolte	Teneur en eau (%)	74	76	77	80	76	80	76
	Alcool °	14.5	13.0	12.2	9.9	13.0	9.9	13.0
	Teneur en sucre (g/L)	244.5	219.1	205.9	166.3	219.1	166.3	219.1

Nombre de Grappes maximal	Côtes du Rhône	15	20					
	Languedoc	15	20					
	Bourgogne		13	13				
	Champagne	19	25		22			
	Anjou		17			18		
	Cognac	25	33				28	
	Bordeaux		17					14

Tableau 29. Concentrations de CO₂ prise en compte pour chacun des scénarios, en tenant compte de la décennie.

	Concentration de CO₂ (ppm)		
	Années 2070-2079	Années 2080-2089	Années 2090-2099
Scénario B2	536	562	590
Scénario A2	650	711	782

Figure 34 a). Prise en compte de l'effet du CO₂ sur l'efficacité de conversion selon le formalisme adapté de Stockle *et al.*, (1992). **b)** Prise en compte de l'effet du CO₂ sur la conductance stomatique (Brisson, 2002c).



stress modéré (SWFAC = 0.6) qui pourrait permettre d'augmenter la vigueur dans certaines parcelles, si nécessaire. L'irrigation est simulée selon un système de goutte-à-goutte enterré dans le sol (10cm), ce qui permet d'utiliser toute l'eau sans perte par évaporation. La quantité maximale journalière d'irrigation a été fixée à 2 mm.

- ❖ Nous avons introduit la possibilité d'utiliser **un mulch végétal** qui pourrait aider à diminuer l'évaporation et modifier la température du sol.

La récolte est déclenchée par le modèle en fonction de la teneur en eau des fruits (cf. I.4) (Tableau 28). Pour cela, nous avons défini pour chaque région, chaque cépage, et selon le type de vin recherché, une valeur de teneur en eau limite à laquelle la récolte démarre. Cela nous permet d'observer si les conditions sont toujours favorables pour récolter les cépages étudiés dans chacune des régions. Par ailleurs, une date de récolte "butoir" a été proposée de manière à déclencher la récolte, dans le cas où de mauvaises conditions climatiques ne permettraient pas de la réaliser au moment voulu.

Enfin, nous n'avons pas testé l'enherbement de la vigne car nous ne voulions pas introduire de difficultés d'interprétation des résultats (compétition pour l'eau et l'azote entre deux espèces).

3.3. Les formalismes du modèle STICS pour l'étude du changement climatique

Le modèle STICS permet de prendre en compte les données climatiques issues des simulations de GCM pour les différents scénarios de changement climatique proposés, de la même manière qu'avec des données météorologiques réelles.

Le modèle prend également en compte l'augmentation de la concentration de CO₂ et son impact sur la physiologie des plantes. Pour cela, il intègre deux formalismes :

- ❖ En tenant compte de l'augmentation de la concentration de CO₂, l'efficacité de conversion est modifiée par la teneur élevée en CO₂ de l'atmosphère (Kimball, 1983 ; Kimball *et al.*, 1993) selon un formalisme adapté de Stockle *et al.*, (1992). L'effet du CO₂ sur l'efficacité de conversion peut être représenté par une relation exponentielle dont le paramètre est calculé de sorte que la courbe passe par le point (600, ALPHACO₂) (Équation 21).

Équation 21 $FCO_2 = 2 - \exp[-KCO_2(CO_2 - 350)]$ et $KCO_2 = \frac{-\log(2 - ALPHACO_2)}{600 - 350}$

où CO₂ est le paramètre qui définit la concentration de CO₂ dans l'atmosphère et ALPHACO₂ est le coefficient de modification de l'efficacité de conversion en cas d'augmentation du CO₂ atmosphérique.

- ❖ L'augmentation de la concentration de CO₂ génère une diminution de la conductance stomatique (Kimball *et al.*, 1993; Drake *et al.*, 1997). Idso (1991) montre qu'il existe une proportionnalité entre l'effet du CO₂ sur l'efficacité de conversion et l'effet du CO₂ sur la conductance stomatique selon un rapport de 2.5 pour un ajout de 300ppm à la concentration nominale. Dans le modèle est proposée une version modifiée du formalisme de Stockle *et al.*, (1992) pour la modification de la résistance stomatique qui permet de tenir compte de l'espèce et d'avoir un effet continu de la concentration du CO₂ (Équation 22) :

Tableau 30. Variables de sortie de STICS observés dans l'étude d'impacts du changement climatique.

Type de Variable	Variable	Définition	Unités
Biomasse	masec	matière sèche aérienne	t.ha-1
	mafruit	matière sèche fruit	t.ha-1
	pdsfruitfrais	poids de fruit total frais	t.ha-1
	mafrais	matière fraîche aérienne	t.ha-1
	resperenne	réserves	t.ha-1
	LAI	Indice de Surface Foliaire	m ² /m ²
Stress	inn1moy	indice de stress azoté sur la période végétative	SD
	inn2moy	indice de stress azoté sur la période reproductrice	SD
	swfac1moy	indice de stress hydrique stomatique moyen sur la période végétative	0-1
	swfac2moy	indice de stress hydrique stomatique sur la période reproductrice	0-1
	turfac1moy	indice de stress hydrique de turgescence sur la période végétative	0-1
	turfac2moy	indice de stress hydrique de turgescence sur la période reproductrice	0-1
	psibase	potentiel foliaire de base	Mpascal
Maturation	tcultmat	Température de culture minimale moyenne pour la période véraison-récolte	°C
	amptcultmat	Amplitude de la température de culture moyenne pour la période véraison-récolte	°C
	nbjsup37mat	Nombre de jours que l'on dépasse la température maximale de remplissage (en tcult)	jours
	H2Orec	teneur en eau des fruits	Jour julien
Phénologie	ifindorms	Date de sortie de dormance	Jour julien
	ilevs	Date de débourrement	Jour julien
	iflos	Date de floraison	Jour julien
	ilaxs	Date de indice foliaire maximale (dans notre cas équivalent à la véraison)	Jour julien
	ilans	Date avec LAI devient nul	Jour julien
	irecs	Date de vendanges	Jour julien
	imats	Date de maturité physiologique	Jour julien
Eau	cep	transpiration cumulée sur la saison de culture	mm
	ces	évaporation réelle cumulée sur la saison de culture	mm
	cet	évapotranspiration cumulée sur la saison de culture	mm
	cetm	évapotranspiration maximale cumulée sur la saison de culture	mm
Environnement	totir	quantité totale des apports d'eau	mm
	Chumt	quantité totale de C humus (fractions active + inerte) dans le sol	t C.ha-1
	resmes	stock d'eau du sol sur la profondeur de mesure	mm
	azomes	quantité d'azote minéral sur la profondeur de mesure	kgN.ha-1

Équation 22

$$FCO2S = \frac{1}{1 + 0.77 \left(1 - \frac{FCO2}{2.5} \right) \left(1 - \frac{CO2}{330} \right)}$$

Enfin, une dernière modification a été introduite dans le modèle, de façon à ce qu'il tienne compte de l'augmentation progressive des concentrations de CO₂. Cette augmentation est décrite par périodes de 10 ans : 2070-2079, 2080-2089, 2090-2099 (Tableau 29).

3.4. Variables de sortie étudiées

Les simulations de cette ont été réalisés de la manière suivante : pour chaque combinaison Région x Sol x Cépage x Structure x Pratiques culturales (éclaircissage oui ou non, irrigation oui ou non, mulch oui ou non), nous avons réalisé la simulation avec tous les années de chaque série climatique (Contrôle, A2 et B2). L'option utilisée dans le modèle a été l'enchaînement d'années de culture, afin de garder l'état du bilan hydrique et azoté du sol et de des réserves azotés et carbonés et du développement racinaire de la plante.

Dans tous les cas, nous avons simulé une série de variables qui décrivent les différents aspects de la croissance (biomasse sèche, réserves, stress hydrique et azoté), du développement (phénologie), de la qualité de la vendange (ici nous ne tiendrons compte que de la teneur en eau), ainsi que des variables descriptives de l'environnement (indices climatiques, quantité d'irrigation, stockage du carbone dans le sol) (Tableau 30).

Toutes ces variables ont été simulées à pas de temps journalier.

Pour l'analyse des résultats, nous avons retenu la valeur moyenne de chaque variable sur toutes les années pour chaque combinaison technique, dans les trois scénarios (Contrôle, A2 et B2), à quatre moments fondamentaux de la croissance et du développement de la plante : la floraison, la véraison, la récolte et la fin du cycle.

3.5. Méthodologie utilisée pour analyser les impacts du changement climatique

Dans un premier temps, nous avons réalisé une analyse des différentes variables simulées par STICS, en prenant en compte les particularités de chaque région (cf.§. III.4). Pour cela, nous avons décrit la situation appelée "structure de base" qui correspondait à la structure actuelle du vignoble dans chacune des régions et nous avons étudié son évolution dans le futur (Tableau 31). Cette analyse nous a permis d'observer les impacts sur le vignoble s'il n'y avait aucune modification de sa structure actuelle. Nous avons réalisé parallèlement une simulation des différentes variables pour les années 2003, 2004 et 2005, afin de pouvoir comparer les résultats des scénarios futurs avec des années climatiques actuelles qui sont assez bien connues (années de l'expérimentation plus l'année de la canicule) (cf. III.4.).

Ensuite, à partir des critères qualitatifs et de production, nous avons cherché la (ou les) structure(s) de plantation et les pratiques culturales qui pourraient permettre d'obtenir les meilleurs résultats (avec ces deux critères) dans le futur (cf. partie 4 dans ce chapitre). Pour cela, nous avons intégré toutes les possibilités techniques et variétales proposées auparavant (Tableau 26), ce qui nous a permis

Tableau 31. Structure de techniques de base retenue pour chaque région (le plus proche de la réalité).

Régions	Cépages	Sols	Densités et hauteur du feuillage	Eclaircissage	Irrigation	Paillage
Côtes du Rhône	Grenache, Syrah	2	3333 ceps/ha avec 1.0 m hauteur du feuillage	Non ou Oui *	Non	Non
Languedoc	Grenache, Syrah	2	3333 ceps/ha avec 1.0m hauteur du feuillage	Non ou Oui *	Non	Non
Bordeaux	Merlot	2	5000 ceps/ha avec 1.3m hauteur du feuillage	Non ou Oui *	Non	Non
Cognac	Ugni Blanc	1	3333 ceps/ha avec 1.5m hauteur du feuillage	Non	Non	Non
Bourgogne	Pinot Noir	1	9090 ceps/ha avec 0.9m hauteur du feuillage	Non	Non	Non
Anjou	Cab Franc	2	5000 ceps/ha avec 1.3m hauteur du feuillage	Non	Non	Non
Champagne	Chardonnay	1	9090 ceps/ha avec 0.9m hauteur du feuillage	Non	Non	Oui

* Dans le cas de l'éclaircissage, s'il est réalisé, on élimine la moitié des grappes.

Figure 35. Schéma qui résumé la méthode utilisée pour étudier les impacts du changement climatiques dans les différents vignobles français.

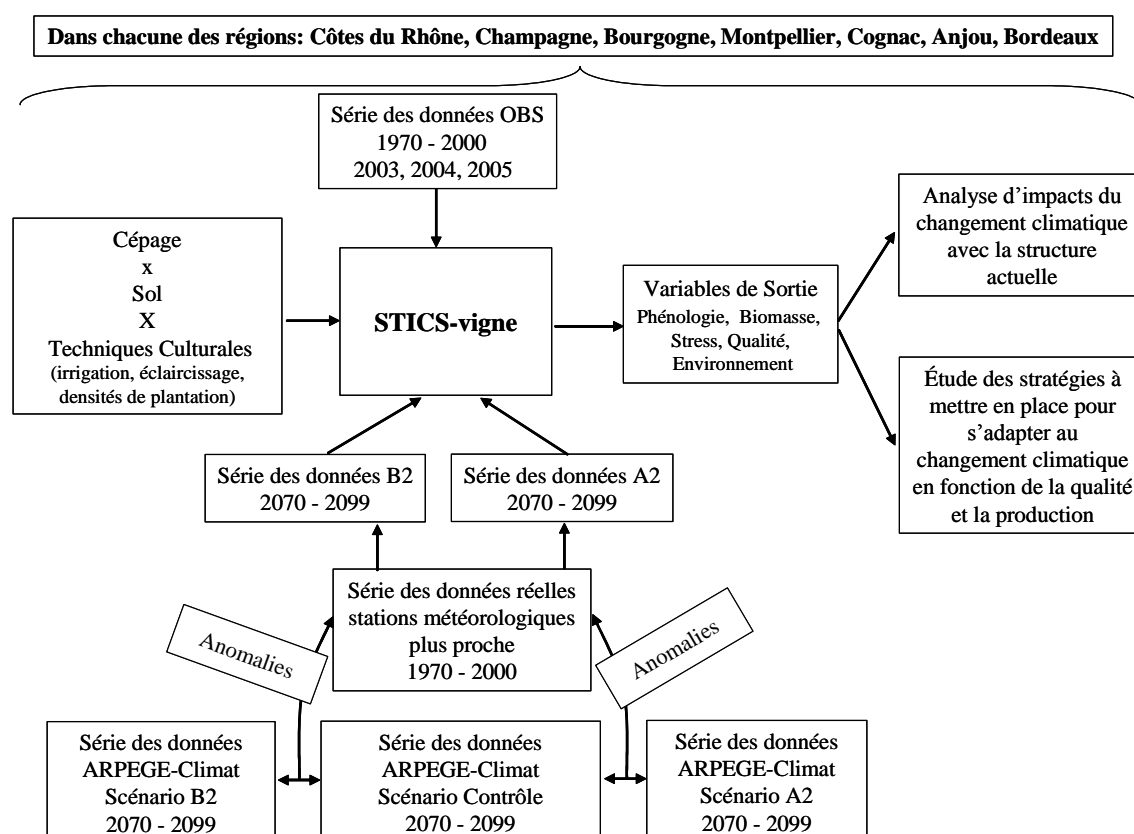


Figure 36. Résultats de la simulation des différents stades phénologiques dans les différentes régions de France.

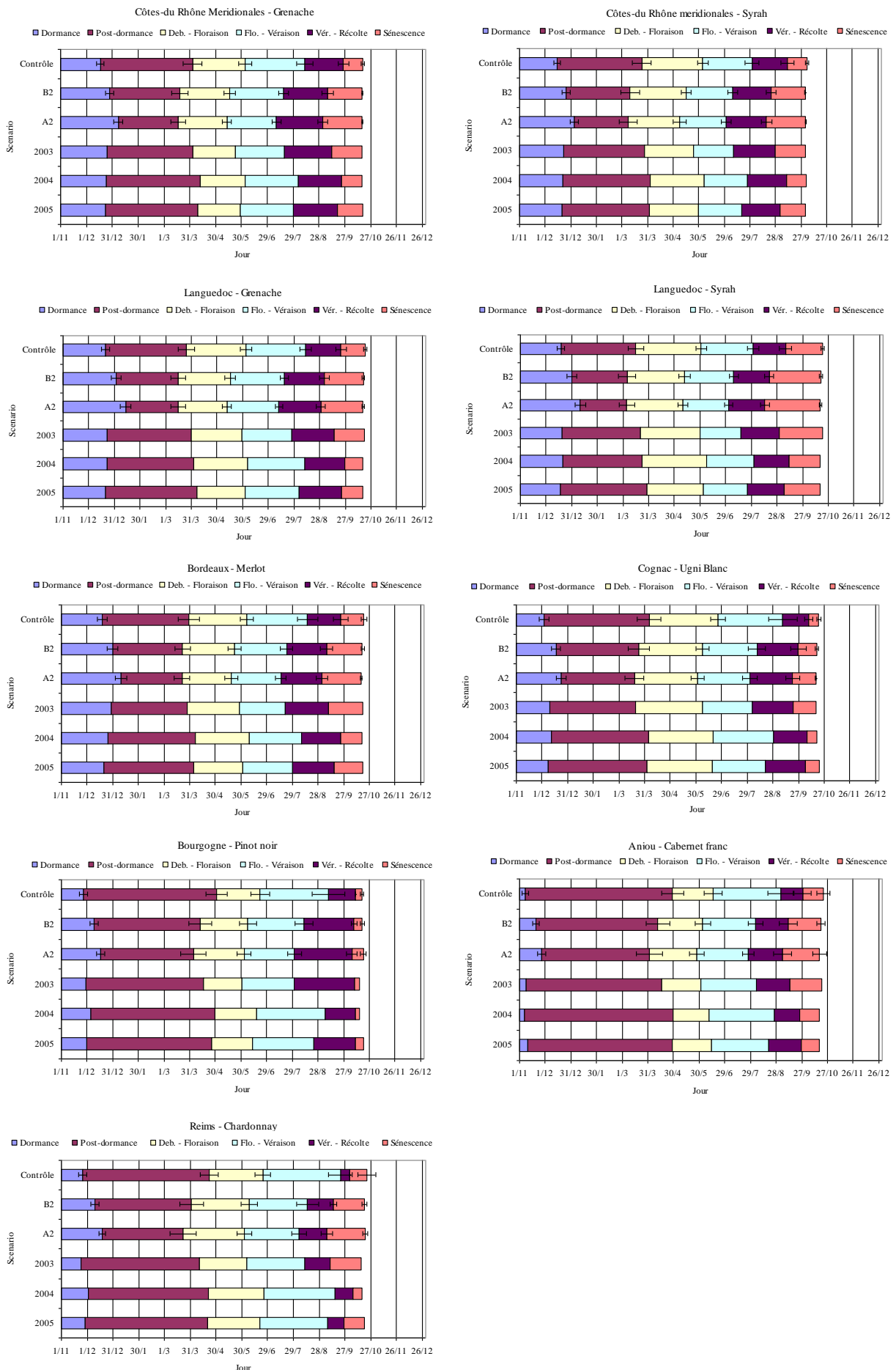


Tableau 32. Déplacement des dates des différents stades phénologiques (en nombre de jours) et de la date de récolte (en fonction de la teneur en eau - teneur en sucre des fruits) des différents régions pour les scénarios A2 et B2 par rapport aux résultats obtenus dans le scénario Contrôle C.

	Cotes du Rhône				Languedoc				Bordeaux	
	Grenache		Syrah		Grenache		Syrah		Merlot	
	A2 – C (Jours)	B2 – C (Jours)	A2 – C (Jours)	B2 – C (Jours)	A2 – C (Jours)	B2 – C (Jours)	A2 – C (Jours)	B2 – C (Jours)	A2 – C (Jours)	B2 – C (Jours)
Sortie de Dormance	21	11	20	10	24	13	23	12	22	12
Débourrement	-17	-15	-16	-14	-10	-10	-10	-10	-8	-8
Floraison	-21	-18	-28	-20	-22	-19	-21	-20	-18	-15
Véraison	-33	-25	-30	-23	-31	-25	-29	-23	-31	-24
Récolte	-24	-18	-25	-19	-24	-19	-24	-19	-22	-16
Sénescence	-1	-1	-1	-1	-2	-2	-2	-2	-3	-2

	Cognac		Dijon		Anjou		Reims	
	Ugni blanc		Pinot noir		Cabernet Franc		Chardonnay	
	A2 – C (Jours)	B2 – C (Jours)	A2 – C (Jours)	B2 – C (Jours)	A2 – C (Jours)	B2 – C (Jours)	A2 – C (Jours)	B2 – C (Jours)
Sortie de Dormance	20	14	20	12	19	12	22	14
Débourrement	-17	-12	-27	-19	-27	-17	-29	-20
Floraison	-24	-18	-19	-14	-19	-12	-27	-20
Véraison	-38	-30	-40	-29	-38	-29	-52	-36
Récolte	-19	-12	-4	-2	-24	-17	-5	-2
Sénescence	-3	-2	2	1	-4	-3	-1	-2

Tableau 33. Durée des périodes entre les différents stades phénologiques (en nombre de jours) et de la date de récolte (en fonction de la teneur en eau des fruits) des différents régions pour les scénarios A2 et B2 par rapport aux résultats obtenus dans le scénario Contrôle.

	Cotes du Rhône				Languedoc				Bordeaux	
	Grenache		Syrah		Grenache		Syrah		Merlot	
	A2 – C (Jours)	B2 – C (Jours)	A2 – C (Jours)	B2 – C (Jours)	A2 – C (Jours)	B2 – C (Jours)	A2 – C (Jours)	B2 – C (Jours)	A2 – C (Jours)	B2 – C (Jours)
Dormance –Débour.	-38	-25	-36	-24	-33	-23	-33	-23	-31	-20
Débour. - Floraison	-5	-3	-11	-6	-13	-9	-11	-10	-10	-7
Floraison -Véraison	-12	-7	-3	-3	-8	-6	-8	-3	-12	-10
Véraison - Récolte	9	7	6	4	7	5	5	3	9	8
Récolte - Sénescence	23	18	24	19	21	17	22	17	18	14

	Cognac		Bourgogne		Anjou		Reims	
	Ugni blanc		Pinot noir		Cabernet Franc		Chardonnay	
	A2 – C (Jours)	B2 – C (Jours)	A2 – C (Jours)	B2 – C (Jours)	A2 – C (Jours)	B2 – C (Jours)	A2 – C (Jours)	B2 – C (Jours)
Dormance –Débour.	-37	-26	-47	-31	-46	-30	-51	-34
Débour. - Floraison	-7	-6	8	4	8	5	1	1
Floraison -Véraison	-15	-12	-21	-15	-19	-17	-24	-17
Véraison - Récolte	20	18	36	27	14	12	46	35
Récolte - Sénescence	16	10	6	2	20	14	4	-1

d'explorer les possibles stratégies d'adaptation qui devront être envisagées dans les différents vignobles de France à cause du réchauffement climatique (cf. III.5.).

La Figure 34 présente un schéma qui résume la méthodologie utilisée pour étudier les impacts du changement climatique dans chaque vignoble.

4. Impacts du changement climatique sur les différentes régions viticoles, selon leur structure actuelle.

A partir des structures de base (Tableau 31), nous avons étudié une série de variables qui vont nous permettre d'évaluer les conditions générales de production des vignobles à la fin du siècle :

- ❖ **La phénologie** : nous avons étudié le déplacement et le raccourcissement des principaux stades phénologiques, ainsi que de la date de vendange, pour un cépage de chaque région. Nous avons aussi regardé la possibilité d'implanter le cépage Syrah dans les différentes régions de France.
- ❖ **Les stress** : nous avons regardé l'évolution et l'accentuation des différents stress (hydrique et azoté), avant et après la floraison, dans chacune des régions et en tenant compte des types de sols étudiés (fRU, gRU).
- ❖ **La biomasse** : nous avons analysé les variations des différentes composantes de la production de biomasse dans chaque région (biomasse végétative, rendement, LAI, biomasse des réserves).
- ❖ **La maturation** : nous avons étudié l'évolution de la teneur en eau simulée par le modèle (cf.§. I.4), et les conditions climatiques de la période de maturation.
- ❖ **L'environnement** : nous avons étudié l'évolution de la capacité de stockage de carbone dans les sols viticoles.

4.1. Phénologie et date de vendange

En ce qui concerne la phénologie, on assiste à un raccourcissement du cycle (en particulier de la période débourrement – véraison) et à un avancement des différents stades dans toutes les régions pour tous les cépages étudiés (Figure 36). Cependant ces tendances ne sont pas de la même intensité selon la région et la période étudiées, avec deux groupes bien différenciés : les régions du Sud (Languedoc, Côtes du Rhône, Bordeaux et Cognac) et les régions du Nord (Anjou, Bourgogne et Champagne). En règle générale, le scénario A2 accentue les tendances apparues dans le scénario B2 (Tableau 32 et Tableau 33).

4.1.1. Période dormance - débourrement

La prise en compte de la dormance a eu un fort impact sur le calcul du débourrement. Ainsi, si dans toutes les régions un avancement des dates de débourrement est observé, dans les régions du sud (Côtes du Rhône, Languedoc et Bordeaux) celui-ci est mitigé par le ralentissement de la satisfaction

des besoins en froid. Ce ralentissement est dû à l'augmentation des températures dans la période hivernale qui vont générer un retard de la sortie de dormance qui, dans certains cas, peut n'avoir lieu qu'après le premier janvier. Ceci confirme les prédictions faites par plusieurs auteurs pour la vigne (Jones, 2003 ; Jones *et al.*, 2005b) ou pour d'autres espèces (Legave, 2005). Ces résultats justifient le fait d'avoir utilisé le modèle BRIN pour calculer le stade débourrement. De cette façon, nous avons pu observer les différentes évolutions de la température et aussi de s'affranchir d'un possible biais dans le résultat final par la non prise en compte de la dormance. Cependant, il est important d'étudier la possibilité de réaliser de mesures de la sortie de dormance au vignoble, afin de contrôler les résultats des simulations réalisées avec le modèle BRIN (calcul mathématique). Un autre élément à prendre en compte est la possibilité d'un étalement plus important des différents stades postérieurs (débourrement, floraison, nouaison, véraison), en raison d'hivers trop chauds (Jones, 2003; Gadoury *et al.*, 2003), et l'impact que ceci pourrait avoir sur le contrôle de la croissance de la plante (notamment via les problèmes posés pour l'application des produits phytosanitaires). La période fin de dormance-débourrement est de toute façon fortement raccourcie dans tous les cas (de 30 à 50 jours selon les cas).

L'avancement de la date de débourrement varie selon les régions : dans les régions du Sud (Côtes du Rhône, Bordeaux, Languedoc, Cognac), il est d'environ 10 à 15 jours pour les deux scénarios (A2 et B2), et dans les régions du Nord (Anjou, Bourgogne, Champagne), d'environ 20 jours pour le scénario B2 et 30 jours pour le scénario A2. Ceci diffère des résultats montrés par Lebon (2002) (débourrement au stade B le 2 février pour le scénario A2 et le 10 février pour le scénario B2), car il utilise le modèle de Pouget (Riou, 1994), lequel ne tient pas compte de la période de dormance. Cet avancement de la date de débourrement dans les régions du Nord, et spécialement en Champagne, pourrait augmenter le risque de gelées quand la végétation est en pleine croissance, même si l'on s'attend à une diminution du nombre de jours froids (IPCC, 2001). En effet, si la dernière date moyenne de gelées en Champagne est actuellement le 26 avril (Madelin et Beltrando, 2006), l'avancement du cycle devrait allonger la période de risque, d'une dizaine de jours (selon les années) à environ 30 jours, ce qui n'est pas négligeable.

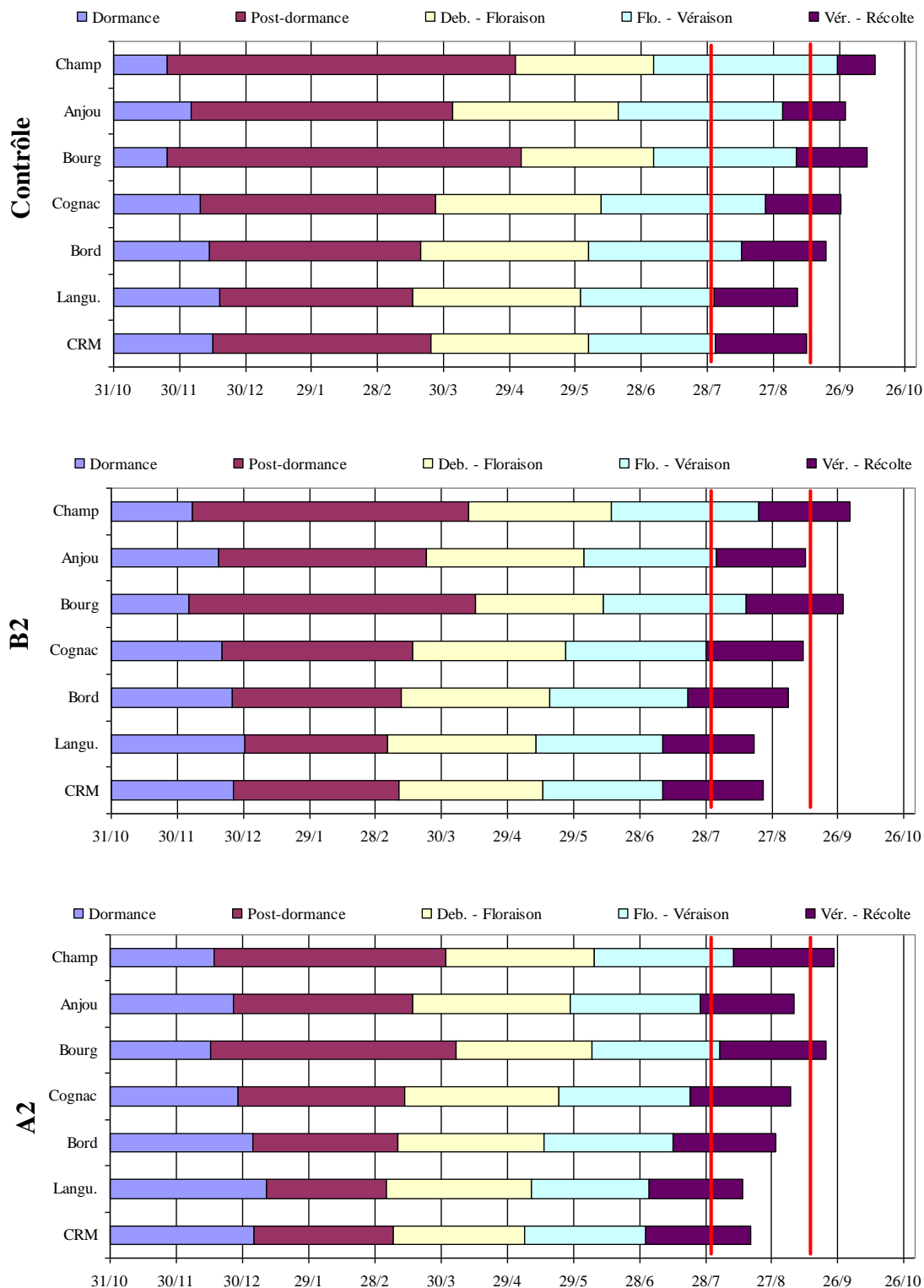
4.1.2. Période débourrement - floraison

La durée de la période débourrement-floraison ne suit pas une tendance claire. Tandis que dans les régions du sud (Côtes du Rhône, Languedoc, Bordeaux, Cognac), la durée est raccourcie (jusqu'à d'une dizaine de jours dans le scénario A2), dans les régions du nord cette durée ne varie pas, voire est plus longue en comparaison avec les résultats issus de la série Contrôle. L'avancement de la date de floraison varie selon les régions et les cépages : il peut varier de 18 à 28 jours pour le scénario A2 et de 12 à 20 jours selon le scénario B2.

4.1.3. Période floraison-véraison

La période floraison-véraison suit un raccourcissement plus accentué dans les régions de Bourgogne, Anjou et Champagne (environ 10 jours pour le scénario B2 et environ 25 jours pour le scénario A2), et plus modéré dans les régions de Côtes du Rhône, Languedoc, Bordeaux et Cognac (d'environ une dizaine de jours pour les deux scénarios). L'avancement de la date de véraison est très important : d'environ 30 jours pour le scénario B2 et 40 jours pour le scénario A2 dans les régions du Nord ; et d'environ 25 jours pour le scénario B2 et 30 jours pour le scénario A2 dans les régions du Sud.

Figure 37. Comparaison des l'évolution de la phénologie du cépage Syrah dans toutes les régions de l'étude, en comparant sa situation actuelle avec le scénario Contrôle (C) (hypothétique) et sa situation dans les deux scénarios futurs B2 et A2. Les traits rouges délimitent la période de maturation actuelle de la Syrah en Côtes du Rhône (CRM) et Languedoc (pendant le mois d'août et jusqu'à la mi-septembre et selon un critère de récolte de 219.1g sucre/l).



4.1.4. La période véraison - vendange

Nous proposons de décrire dans cette partie l'interprétation de la période véraison – vendange, même si l'on ne considère pas la date de vendange comme un stade phénologique.

Dans les régions de Côtes du Rhône, Languedoc, Bordeaux, Anjou et Cognac, nous observons un avancement de la date à laquelle les baies possèdent la même teneur en eau. Dans ces régions, cette date était pratiquement toujours atteinte dans le scénario Contrôle. Par contre la période véraison-vendanges est légèrement allongée, à cause de l'avancement de la période véraison-récolte vers des périodes plus chaudes, ce qui favorise l'arrêt de remplissage des grains à cause des températures trop élevées (Dokoolzian et Bergqvist, 2001).

L'interprétation de cette période pour les régions de Champagne et Bourgogne est plus compliquée, car dans la plupart des cas, c'est la date "butoir" qui détermine la récolte. Si l'on avait laissé le modèle continuer jusqu'à ce qu'il arrive à la teneur en eau demandée initialement, on aurait pu observer des dates de vendange très tardives (mois de novembre et décembre) et complètement irréelles. Dans ces régions, il apparaît un léger avancement de la date de vendanges, mais dans ce cas, si l'on compare les teneurs en eau à la même date dans le scénario Contrôle avec les scénarios futurs, on obtient des valeurs plus faibles (donc des teneurs en sucre plus élevées) pour le scénario Contrôle.

4.1.5. Période vendange - chute des feuilles

Enfin, nous avons analysé la période vendange–chute des feuilles. A cause de l'avancement de la date de récolte dans pratiquement tous les cas, la période entre la récolte et la chute de feuilles est plus longue, ce qui aura un important impact sur le stockage des réserves. Cependant, le formalisme développé pour décrire la sénescence des feuilles n'a pas montré une très forte sensibilité à l'augmentation de la température, et c'est finalement la photopériode qui gère de manière très importante la date finale simulée.

4.1.6. Comparaison avec le cycle phénologique de l'année 2003

Pour avoir un repère de l'envergure des impacts attendus, nous avons comparé ces résultats avec les données de la phénologie simulée pour les différents sites en 2003 (Figure 36). On rappelle que cette année la France avait subi une période de canicule dans les mois de juillet et août, qui avait généré un avancement des stades phénologiques. Dans les régions des Côtes du Rhône Méridionales et du Languedoc, les prévisions des scénarios A2 et B2 montrent une précocité plus importante que celle observée en 2003. Dans les vignobles d'Anjou, Bordeaux et Cognac, le scénario B2 fournit des résultats semblables au développement observé en 2003, tandis que le scénario A2 simule un développement légèrement plus précoce. En Bourgogne, le scénario A2 simule le même développement que durant l'année 2003. En Champagne, l'année 2003 se présente comme une situation intermédiaire entre les scénarios A2 et B2. Toutes ces observations permettent de considérer l'année 2003 comme une année « type », et à la prendre en compte comme référence pour les études du changement climatique. Cependant, ceci n'est vrai que pour les mois de juin, juillet et août, car dans les autres périodes de l'année, les conditions sont très différentes (pluviométrie et températures) de celles attendues pour le futur.

Tableau 34. Evolution des indices de stress hydrique et azoté dans les deux scénarios A2 et B2. En rouge sont marqués les augmentations de stress, soit hydrique, soit azoté.

		Variation de l'Indice de stress stomatique moyen (Transpiration réelle/Transpiration maximale) (%)			
		Débourrement-Floraison		Floraison-Récolte	
	Sol	Rapport A2/Contrôle	Rapport B2/Contrôle	Rapport A2/Contrôle	Rapport B2/Contrôle
Côtes du Rhône	fRU	0	0	-11	-8
	gRU	0	0	-2	-2
Languedoc	fRU	4	3	-4*	-4*
	gRU	2	1	-6*	-6*
Bordeaux	Argiles	0	0	-3	-4
	Graves	0	0	-3	-5
Cognac		0	0	-6	-5
Bourgogne		1	1	-17	-6
Anjou	fRU	6	2	-33	-27
	gRU	0	0	-12	-13
Champagne		0	0	-6	-5

		Variation de l'Indice de stress azoté moyen (%)			
		Débourrement-Floraison		Floraison-Récolte	
	Sol	Rapport A2/Contrôle	Rapport B2/Contrôle	Rapport A2/Contrôle	Rapport B2/Contrôle
Côtes du Rhône	fRU	4	4	7	5*
	gRU	0	0	8	5
Languedoc	fRU	11	8	5*	1*
	gRU	19	18	8	5
Bordeaux	Argiles	10	8	4	3
	Graves	12	8	1*	1*
Cognac		37	29	2*	1*
Bourgogne		8	3	-3	-1*
Anjou	fRU	-2	-1	-8	-5*
	gRU	14	4	-4	-2*
Champagne		0	0	-11	-7

*Valeur non significatif. (p >0.05).

4.1.7. Etude d'adaptation du cépage Syrah dans les différentes régions

Nous nous sommes également interrogés sur la possibilité d'implantation d'autres cépages dans les différentes régions de France. La Syrah, même s'il n'est pas le plus tardif de notre base de données (contrairement au Grenache et au Ugni Blanc), présentait après consultation des experts des différentes régions de notre étude, un réel intérêt pour l'avenir. Il aurait cependant été intéressant de tester un autre cépage dans les régions du sud (par exemple le Mouvedre), mais ceci n'était pas possible car nous n'avions pas ce type de cépage dans notre base de données et nous n'aurions pas pu réaliser la même étude dans toutes les régions. Nous avons donc simulé la phénologie du cépage Syrah dans chacune des régions, sachant que la date de vendange était déclenchée lorsque la teneur en eau du fruit était arrivée à 76% (l'équivalent de 13° d'alcool), ce critère de récolte étant calculé sur les pratiques actuelles des régions d'origine de ce cépage, Côtes du Rhône et Languedoc. En outre, nous avons aussi déterminé comme condition dans cette analyse, que la période de maturation (véraison-récolte) s'étale sur la même période qu'elle le fait actuellement dans les régions des Côtes du Rhône et Languedoc (mois d'août et début septembre).

La Figure 37 montre la phénologie du cépage Syrah, dans chacune des régions de l'étude et dans chacun des scénarios. Le résultat de cette simulation montre que, dans les conditions énoncées ci-dessus et pour le scénario B2 (le moins pessimiste), la culture de Syrah pourrait s'implanter dans les vignobles de Bordeaux et Anjou. Cependant, le scénario A2 montre des limites à l'adaptation aux vignobles de Champagne et de Bourgogne, selon les conditions établies dans notre étude (la période de maturation se produit au même moment que dans les régions de production actuelles). Néanmoins, une analyse moins stricte pourrait laisser la possibilité d'adaptation de ce cépage dans ces régions, pour la production de raisins moins sucrés (il faut rappeler que le critère de récolte était déterminé à partir d'environ 220gr de sucre/l – 13° d'alcool). Cette analyse a été faite sans prendre en compte les caractéristiques pédologiques et techniques (composantes du terroir) de chaque vignoble, et sachant que nous ne pouvons pas déterminer, à l'aide du modèle, la typicité (acidité, composants phénoliques, etc...) d'un vin issu d'un cépage.

En conclusion, l'adaptabilité d'un tel cépage pourrait se produire dans toutes les régions, mais il est clair que chaque terroir donnera une typicité particulière aux différents vins produits avec ce même cépage.

4.2. Stress

Nous avons étudié les indices moyens de stress hydrique (SWFAC) et azoté (INN) avant la floraison et entre la floraison et la récolte (Tableau 34).

4.2.1. Stress hydrique

Les stress hydriques montrent une tendance globale claire.

Dans la période débourrement-floraison, nous observons une situation similaire à la situation actuelle (mêmes niveaux de stress ou diminution). Les anomalies calculées à partir des données simulées par ARPEGE-Climat montrent une augmentation de la pluviométrie (plus ou moins intense) pendant l'automne et l'hiver et une diminution au printemps et à l'été (Figure 33). Il faut remarquer que dans les régions du sud-est (Languedoc et Côtes du Rhône) apparaît une augmentation à partir du mois d'août

Tableau 35. Evolution du LAI et du stress hydrique (en %) à la récolte dans les scénarios futurs (A2 et B2), par rapport à la structure de base utilisé dans chacune des régions. Une valeur négative correspond à une diminution du LAI et à une augmentation du stress, et vice-versa. La structure 1 correspond à la 3333 ceps/ha - 1m de hauteur feuillage; la structure 2 correspond à 3333 ceps/ha - 1.5m de hauteur feuillage; la structure 3 correspond à 5000 ceps/ha - 1.3m de hauteur feuillage; la structure 4 correspond à 9090 ceps/ha - 0.9m de hauteur feuillage. Les chiffres en gras correspondent à la structure utilisée actuellement.

			Scénario	A2 - Contrôle				B2 - Contrôle			
RU disp. (mm)		Structure	1	2	3	4	1	2	3	4	
Côtes du Rhône	fRU	120	Evolution du LAI (%)	-3	-4	30	88	-1	-3	30	86
			Evolution de l'Indice de stress stomatique (%)	-11	-15	-25	-34	-9	-14	-25	-34
	gRU	232	Evolution du LAI (%)	-6	-3	28	110	-5	-2	30	114
			Evolution de l'Indice de stress stomatique (%)	-2	-5	-12	-20	-2	-5	-12	-20
Languedoc	fRU	97	Evolution du LAI (%)	55	57	116	212	55	57	111	202
			Evolution de l'Indice de stress stomatique (%)	53	52	38	25	57	54	40	27
	gRU	133	Evolution du LAI (%)	11	11	53	119	10	10	49	108
			Evolution de l'Indice de stress stomatique (%)	1	0	-9	-19	1	-1	-10	-20
Bordeaux	Argiles	183	Evolution du LAI (%)			25	71			20	59
			Evolution de l'Indice de stress stomatique (%)			-3	-8			-4	-9
	Graves	175	Evolution du LAI (%)			19	64			14	55
			Evolution de l'Indice de stress stomatique (%)			-4	-10			-5	-11
Cognac		122	Evolution du LAI (%)	17	20	64	118	-5	-3	30	73
			Evolution de l'Indice de stress stomatique (%)	-6	-7	-13	-20	-4	-6	-11	-17
Bourgogne		110	Evolution du LAI (%)				61				40
			Evolution de l'Indice de stress stomatique (%)				-17				-6
Anjou	fRU	50	Evolution du LAI (%)			17	54			11	32
			Evolution de l'Indice de stress stomatique (%)			-12	-21			-13	-21
	gRU	176	Evolution du LAI (%)			9	28			-2	28
			Evolution de l'Indice de stress stomatique (%)			-33	-42			-27	-34
Champagne		144	Evolution du LAI (%)				-4				-4
			Evolution de l'Indice de stress stomatique (%)				-9				-7

et septembre et qui va durer pendant tout l'hiver. Ainsi, la plante ne montre pas de stress au début du cycle jusqu'à la floraison. Dans le cas du Languedoc, la plante serait encore moins stressée qu'à l'époque actuelle.

Cette situation est inversée dans la période floraison-récolte. Toutes les régions présentent une augmentation du niveau du stress hydrique (avec plus ou moins d'intensité), qui est accentuée pour le scénario A2. Les types de sol ainsi que la gestion de la plante (meilleure efficacité d'utilisation de l'eau) sont fondamentaux dans la gestion des stress hydriques. Comme nous allons le décrire dans l'étude d'impacts sur la biomasse, le manque de stress au début du cycle va permettre une bonne croissance de la biomasse végétative et la présence de stress pendant la maturité va limiter la croissance des fruits.

Néanmoins, il ne faut pas oublier que la méthode choisie pour calculer les impacts du changement climatique ne nous permet pas de tenir compte d'une possible nouvelle distribution de la pluviométrie, ni d'une augmentation des événements intenses (épisodes cévenols de fréquence centenaire). Cela pourrait modifier complètement le niveau de remplissage de la réserve en eau du sol au début du cycle de la vigne en raison des pertes par ruissellement, et l'érosion des sols pourrait devenir un enjeu majeur dans les vignobles en côte (Schultz, 2000). D'autre part, il faut remarquer que l'échantillon de sols utilisé pour étudier les impacts du changement climatique ne comprend pas tous les types de sols présents dans chaque région. Ainsi, étant donné que nous avons utilisé des sols de nos bases de données, il est possible que les sols présentés (à l'exception du sol d'Anjou) ne montrent pas de situations fortement stressées qui pourraient être fortement pénalisées dans le futur (sols sableux de la région de Languedoc et Côtes du Rhône, ou les graves avec une faible réserve utile du Bordeaux). Enfin, une des propositions du rapport de l'ONERC (Agenis-Nevers, 2006) était d'augmenter la densité de plantation "de façon à protéger les grappes du rayonnement". Nous avons étudié l'impact de cette augmentation sur les stress. Dans tous les cas, cette augmentation de la densité serait accompagnée d'une augmentation du LAI (en accord avec l'objectif), mais dans certains cas (surtout dans les cas à fRU), les stress pourraient augmenter de 10-15%, ce qui dans certaines situations pourrait s'avérer critique (Tableau 35).

4.2.2. Stress azoté

Par rapport à l'indice de stress azoté, on observe deux tendances différentes : d'une part, une diminution du stress azoté pendant tout le cycle dans les régions de Languedoc, Bordeaux, Cognac et Côtes du Rhône; et d'autre part, une augmentation du stress azoté à la fin du cycle (période floraison - vendange) dans les régions de Bourgogne, Champagne et la région d'Anjou pour le sol à fRU. Cette augmentation des stress peut être justifiée par l'amélioration des conditions climatiques pour la croissance (surtout au début du cycle) qui peut se traduire par une plus forte demande d'azote par la plante.

4.3. Biomasse et LAI

4.3.1. Biomasse végétative (feuilles, rameaux) à la vendange

Il est observé une augmentation, plus ou moins accentuée (dans tous les cas significative), selon les régions et les sols étudiés (sols à forte réserve utile et à faible réserve utile), mais l'impact varie selon les régions (Figure 38 et Tableau 36a).

Tableau 36. Evolution de la quantité (a) et du coefficient de variation (b) de biomasse sèche dans la partie végétative et dans les fruits dans les conditions des scénarios futurs A2 et B2, par rapport aux valeurs observés dans le scénario contrôle (C).

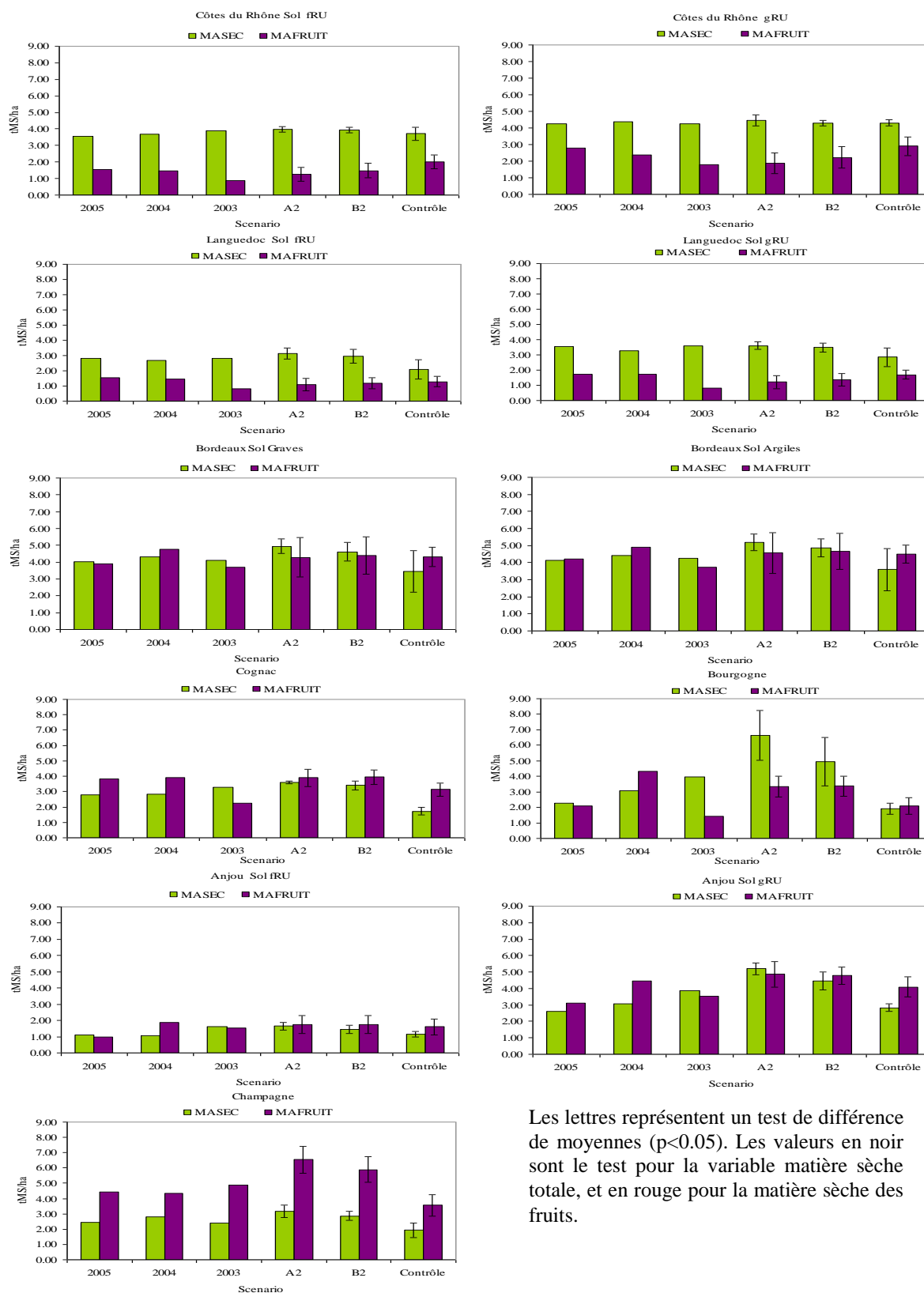
a)

		Evolution de la quantité de biomasse (%)	
		Scénario A2 par rapport au scénario Contrôle	Scénario B2 par rapport au scénario Contrôle
Côtes du Rhône	Biomasse Végétative	5	3
	Biomasse des fruits	-37	-25
Languedoc	Biomasse Végétative	36	30
	Biomasse des fruits	-23	-15
Bordeaux	Biomasse Végétative	44	35
	Biomasse des fruits	1	3
Cognac	Biomasse Végétative	108	97
	Biomasse des fruits	24	26
Bourgogne	Biomasse Végétative	247	159
	Biomasse des fruits	59	60
Anjou	Biomasse Végétative	71	48
	Biomasse des fruits	16	14
Champagne	Biomasse Végétative	65	49
	Biomasse des fruits	84	66

b)

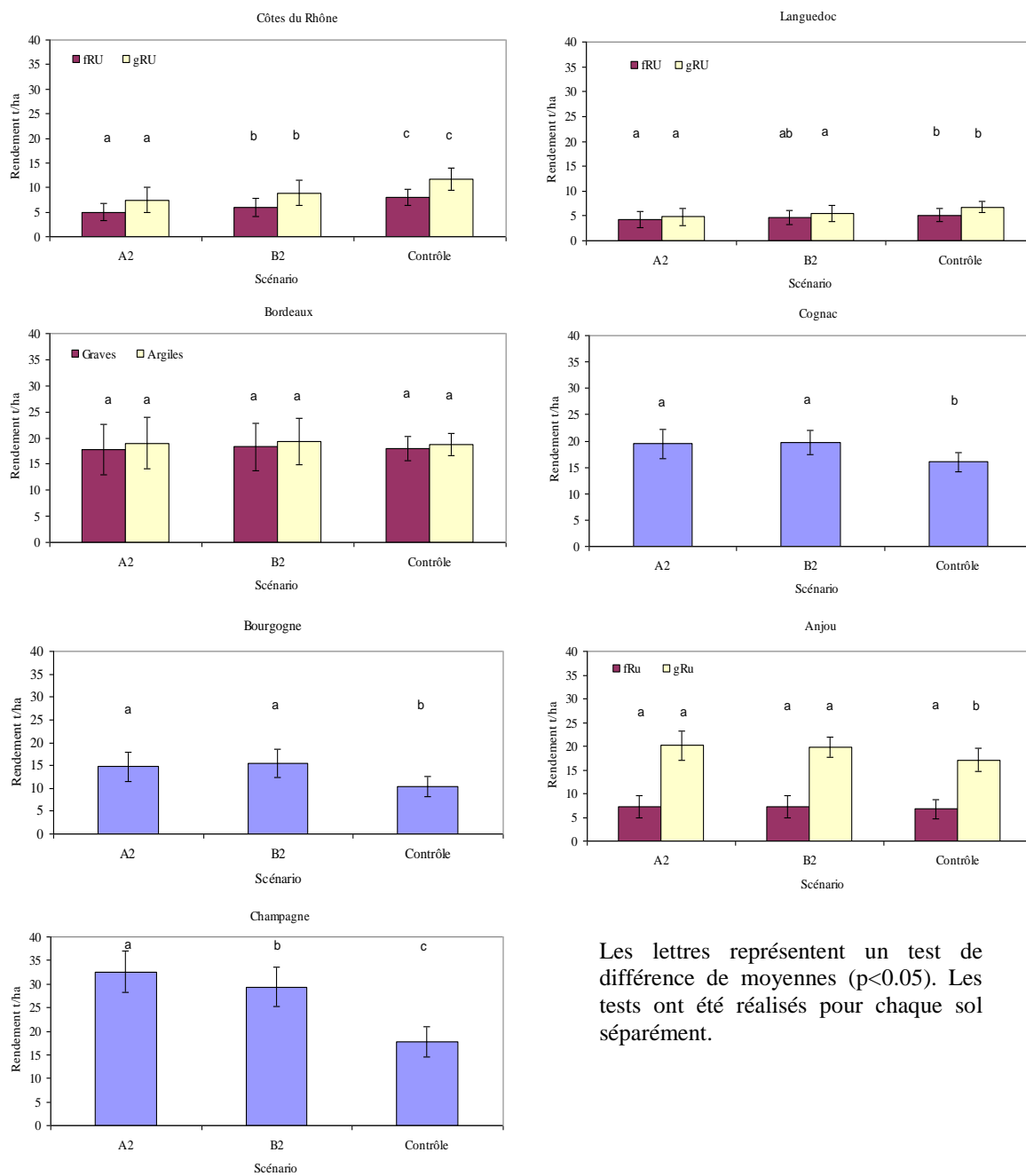
		Evolution du coefficient de variation (%)	
		Scénario A2 par rapport au scénario Contrôle	Scénario B2 par rapport au scénario Contrôle
Côtes du Rhône	Biomasse Végétative	-3	-5
	Biomasse des fruits	13	9
Languedoc	Biomasse Végétative	-18	-15
	Biomasse des fruits	12	8
Bordeaux	Biomasse Végétative	-26	-24
	Biomasse des fruits	14	11
Cognac	Biomasse Végétative	-12	-6
	Biomasse des fruits	1	-2
Bourgogne	Biomasse Végétative	5	12
	Biomasse des fruits	-5	-7
Anjou	Biomasse Végétative	10	10
	Biomasse des fruits	3	2
Champagne	Biomasse Végétative	-13	-16
	Biomasse des fruits	-6	-5

Figure 38. Résultats de la simulation de la matière sèche végétative aérienne (MASEC) et de la matière sèche des fruits (MAFRUIT) simulées avec les climats des années 2003, 2004 et 2005 et des scénarios climatiques de contrôle (C), B2 et A2, sur les sols à fRU et gRU.



Les lettres représentent un test de différence de moyennes ($p < 0.05$). Les valeurs en noir sont le test pour la variable matière sèche totale, et en rouge pour la matière sèche des fruits.

Figure 39. Résultat de l'évolution des Rendements frais (t/ha) dans les différents scénarios futurs Contrôle (C), B2 et A2.



Les lettres représentent un test de différence de moyennes ($p < 0.05$). Les tests ont été réalisés pour chaque sol séparément.

Ainsi, l'augmentation la plus importante est observée dans le vignoble de Bourgogne avec +247% pour le scénario A2 et +159 % pour le scénario B2 La région de Cognac est juste derrière avec une augmentation de 100% pour les deux scénarios et les régions de Bordeaux et Champagne présentent des augmentations d'environ 50% pour le scénario A2 et 35 % pour le scénario B2.

Dans les régions d'Anjou et Languedoc, la biomasse végétative présente des augmentations différentes selon la RU disponible dans le sol. Dans ce cas, le modèle traduit bien les différences de vigueur qui pourraient être observées entre une parcelle à fRU et une parcelle à gRU. Par contre, dans la région d'Anjou, l'augmentation plus importante de la biomasse se produit dans la parcelle à gRU, contrairement à la région de Languedoc, où elle s'est faite dans la parcelle à fRU. Ceci peut s'expliquer par les différents niveaux de stress présent dans chaque région, ainsi que par les différents impacts de l'augmentation des températures par rapport à un optimum de production (amélioration de la situation dans le cas du vignoble d'Anjou, contre un dépassement ou limitation dans le vignoble du Languedoc).

Dans la région des Côtes du Rhône, l'augmentation est très faible (environ +5%), si l'on compare aux niveaux de production actuelle (elle est significative dans le sol fRU pour les deux scénarios et seulement dans le scénario A2 pour le sol gRU). Les conditions favorables dans le futur à la production de biomasse végétative (augmentation de l'efficacité de conversion et de l'efficacité d'utilisation de l'eau), ne suffisent pas pour augmenter le niveau de production, à cause d'un dépassement de l'optimum de température et du raccourcissement de la période de croissance végétative (d'environ 15 jours). Cette compensation des stress fait qu'il n'apparaît pas de variation dans ce vignoble.

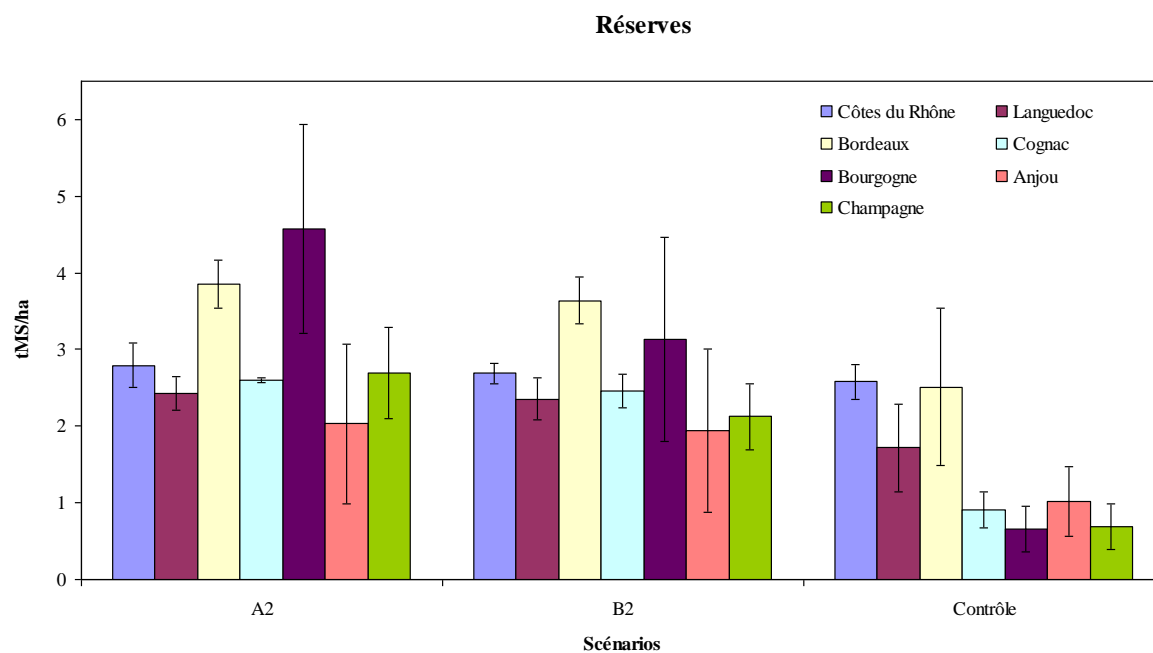
Dans la plupart des cas, on n'observe pas de fortes différences entre les scénarios A2 et B2 si l'on tient compte des écart-types (le maximum est de 15%), mais néanmoins elle sont significatives. L'augmentation de la concentration en CO₂, et donc l'augmentation des efficacités de conversion et de gestion de l'eau, pourraient être limitées par la capacité réelle de production de biomasse par la plante dans le modèle (voir cas de Champagne cf.III.5.4.) et par des stress plus accentués (hydrique et azoté, ainsi que de fortes températures).

Enfin, si l'on observe les coefficients de variation (Tableau 36 b), ils ont une légère tendance à la baisse dans toutes les régions sauf dans les régions d'Anjou et de Bourgogne, où ils restent constants, ce qui signifie moins de variabilité dans la production interannuelle de la biomasse végétative.

4.3.2. Biomasse des fruits

Les plus fortes augmentations de la biomasse de fruits sont observées dans les régions de Champagne et Bourgogne (Tableau 36a et Figure 38). Ces deux régions présentent une amélioration de leurs conditions de production par rapport à l'époque actuelle. Cependant, il apparaît une différence très importante en terme de quantité de production entre les deux régions : tandis qu'en Champagne l'augmentation est de +73% dans le scénario A2 et +59% dans le scénario B2, en Bourgogne l'augmentation reste stable autour de 58% dans les deux scénarios. Ceci peut s'expliquer, d'une part, par les différences liées aux sols et au climat de chaque région, et d'autre part, par la différence du nombre maximal de grappes laissées dans chaque région (22 grappes en Champagne, contre 13 grappes en Bourgogne), ce qui limite la production de manière importante. Il faut remarquer aussi que dans la région de Champagne on observe une augmentation entre les scénarios A2 et B2 due surtout au fait qu'elle ne se trouve peut-être pas encore dans son optimum de production dans le scénario B2. Par

Figure 40. Résultat de l'évolution des réserves dans les différents scénarios A2, B2 et Contrôle. Les différences sont significatives pour tous les cas.



contre, en Bourgogne, il n'apparaît pas d'évolution significative entre les deux scénarios, ce qui peut s'expliquer par la limitation de la production, par l'importance de la surproduction de biomasse végétative et par une légère intensification des stress hydriques (cf. III.4.2) qui ne permettrait pas d'augmenter encore plus la production.

La région de Cognac présente une augmentation de la biomasse sèche des fruits d'environ 25% pour les deux scénarios. Même s'il n'apparaît pas une différence importante entre la production des deux scénarios étudiés, elle est significative. Les conditions futures permettent une amélioration de la production dans un premier temps (scénario B2), mais elle est limitée dans un deuxième temps par l'augmentation des différents stress (hydriques et thermiques) et de la biomasse végétative (similaire au cas de Bourgogne).

Dans les régions d'Anjou et Bordeaux, on observe une stagnation de la production de biomasse qui est due à la limitation des effets positifs sur la croissance : par le nombre de grappes laissées, par la forte augmentation de la biomasse végétative (cas de Bordeaux), et par l'augmentation des stress (en particulière, dans les sols à fRU de la région d'Anjou). Il n'y a pas de différences significatives entre les rendements des scénarios A2 et B2.

Dans les vignobles des Côtes du Rhône et du Languedoc, nous observons une diminution de la biomasse des fruits dans tous les cas : -35% dans le scénario A2 et -24% dans le scénario B2 pour le vignoble des Côtes du Rhône ; -23% dans le scénario A2 et -14% dans le scénario B2 pour le vignoble du Languedoc. Dans le cas du vignoble du Languedoc, la différence entre les scénarios A2 et B2 n'est pas significative. Ceci peut s'expliquer par plusieurs raisons :

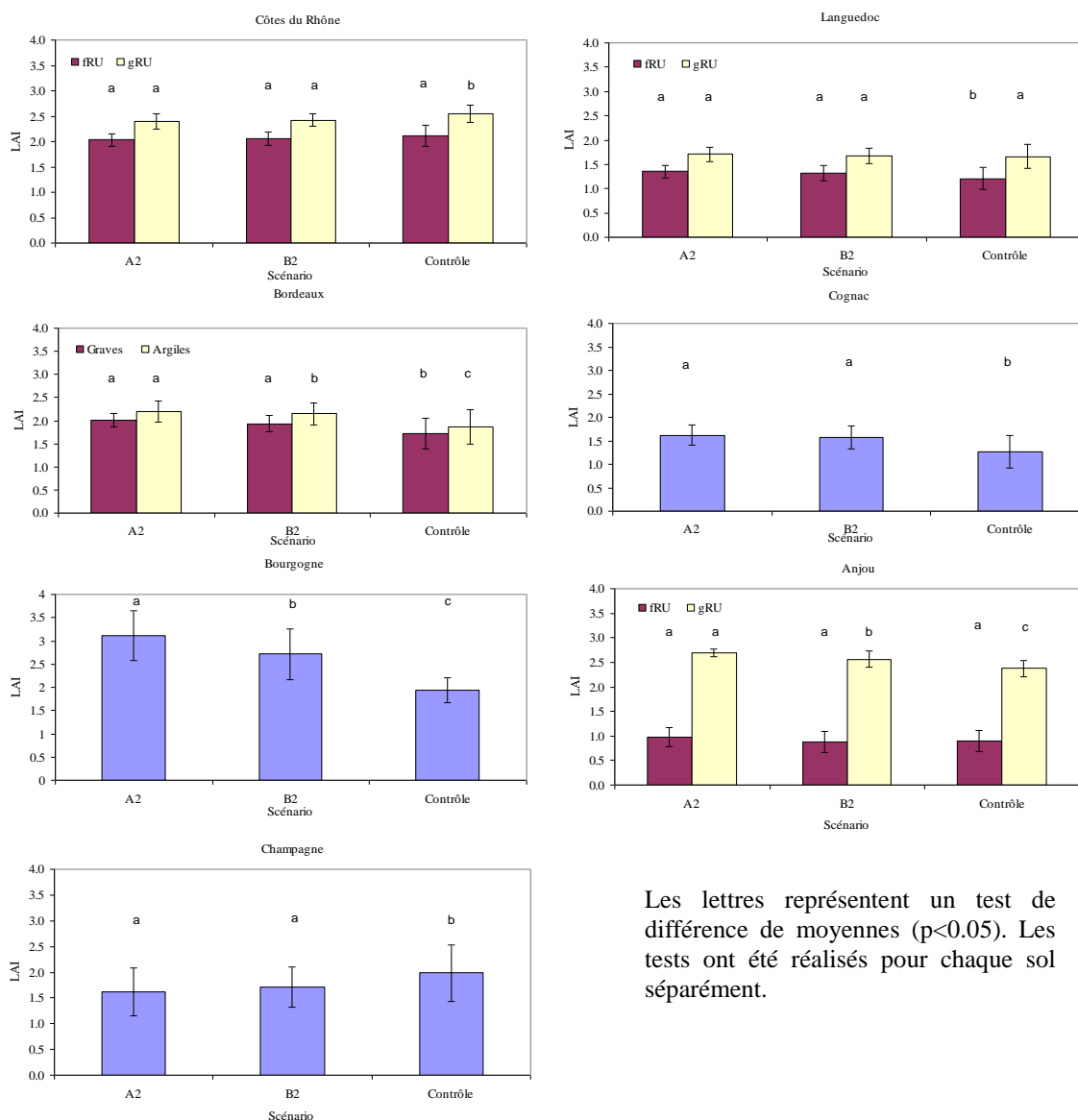
- ❖ le dépassement de l'optimum thermique journalier actuel durant les périodes de croissance, avec des températures plus élevées mais qui ne sont pas favorables à la production ;
- ❖ une intensification des stress hydriques dans la période de maturation, surtout dans les zones avec faibles réserves utiles. La mise en place plus rapide et plus facile de la surface foliaire, combinée à la diminution des précipitations estivales, favorise ce type de situations ;
- ❖ un raccourcissement du cycle de la vigne. L'analyse de la phénologie nous a déjà montré un raccourcissement du cycle dans la période floraison-véraison, qui diminue de manière importante la période de croissance ;
- ❖ une plus forte compétition avec la partie végétative (cas du Languedoc). Nous avons vu que la mise en place du feuillage va pouvoir se faire de la même façon que dans la période actuelle, cependant cela pourrait générer de fortes compétitions source-fruits.

Finalement, par rapport à la variabilité de la production de biomasse des fruits, certaines régions (Bordeaux, Languedoc, Côtes du Rhône) montrent une tendance à la hausse, en accord avec les résultats de Bindi *et al.*, (2001b), pendant les autres (Champagne, Bourgogne, Anjou et Cognac) ne montrent pas de différence par rapport à la variabilité actuelle (Tableau 36 b). La Figure 39 représente les rendements en fruits frais, qui sont les mêmes que pour la biomasse sèche des fruits.

4.3.3. Réserves

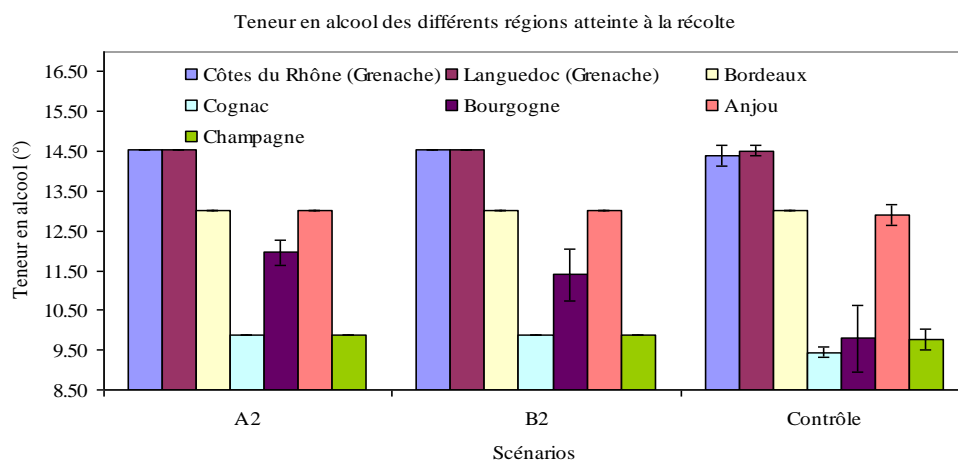
Une augmentation significative de la quantité de réserves stockées dans la plante dans les différentes régions a été observée (Figure 40).

Figure 41. Evolution du LAI en fonction du type du sol dans les différents scénarios B2, A2 et Contrôle.



Les lettres représentent un test de différence de moyennes ($p < 0.05$). Les tests ont été réalisés pour chaque sol séparément.

Figure 42. Evolution de la teneur en alcool (calculé à partir de la teneur en eau du raisin), pour les différentes régions et pour les différents scénarios A2, B2 et Contrôle.



Dans les régions de Bourgogne et de Champagne, cette augmentation est intensifiée dans le scénario A2 par rapport au scénario B2, contrairement aux régions de Bordeaux, Anjou, Cognac et Languedoc dans lesquelles cette évolution entre les deux scénarios est très faible. Comme nous l'avons expliqué auparavant, la mise en réserves peut se réaliser tout au long du cycle, mais la plus grosse partie est stockée dans la période qui suit les vendanges. Dans les conditions attendues pour le futur, cette période sera plus clémente, ce qui permettra un meilleur fonctionnement de la plante et moins de risques de gelées. De plus, la quantité des réserves qu'il est possible de stocker dans la plante est limitée par le volume des parties pérennes (cf.§. I.6). Dans le cas des Côtes du Rhône, il est probable que cette capacité maximale soit déjà atteinte actuellement (climat favorable au stockage des réserves), et donc il n'y aura pas de variation dans le futur. De même, la région de Cognac présente une variabilité très faible pour le scénario A2 (valeurs d'écart-type très faibles), ce qui montre que dans ce scénario le modèle considère également que la plante arrive à stocker le maximum des réserves possibles pour toutes les années de simulation.

Néanmoins, il est intéressant de remarquer que dans deux régions avec les mêmes densités de plantation, Champagne et Bourgogne, la quantité de réserves stockées n'est pas la même. Ceci s'explique par la différence de la demande faite par la plante pendant le cycle (qui est plus importante dans le cas champenois à cause de sa forte charge en grappes), et par les conditions climatiques un peu moins favorables en Champagne qu'en Bourgogne. Comme il a été montré pour la production de la biomasse des fruits, la région de Champagne ne serait pas encore au maximum de sa capacité de production. Ces résultats obtenus sur les réserves expliquent d'une certaine façon les augmentations de biomasse végétative montrées auparavant (cf. III.4.3.1.).

4.3.4. LAI

L'évolution du LAI suit des tendances différentes selon les régions (Figure 41).

Dans la région des Côtes du Rhône, on observe une diminution du LAI, mais elle n'est significative que dans les parcelles avec un sol à gRU. Il n'y a pas d'évolution significative entre les deux scénarios futurs. La combinaison des stress thermiques et hydriques explique cette diminution du LAI.

Dans la région du Languedoc, contrairement aux Côtes du Rhône, on observe une légère augmentation du LAI, mais elle n'est pas significative dans les parcelles avec un sol à gRU. Dans ce cas, il n'existe pas non plus de différence significative entre les deux scénarios futurs. Il est intéressant de remarquer les différentes tendances observées entre ces deux régions, si proches géographiquement et météorologiquement (climat méditerranéen). Cela peut s'expliquer en partie, par les différences entre les sols utilisés dans chacune des régions, mais aussi par les différences de quantité de pluviométrie entre les deux sites (Figure 33) : une augmentation plus importante dans la région du Languedoc que dans celle des Côtes du Rhône.

Dans les régions de Bordeaux, Cognac, Bourgogne et Anjou, l'augmentation du LAI est significative dans tous les cas, et même entre scénarios (sauf dans les parcelles avec le sol à fRU de la région d'Anjou, dans lesquelles le stress hydriques est trop élevé). L'effet positif de l'augmentation de CO₂ et des températures permet une augmentation qui dans certains cas est très importante (cas de la Bourgogne).

Le cas de la Champagne est particulier : on observe une diminution significative du LAI par rapport aux résultats du scénario Contrôle. Cela s'explique par la forte demande de la croissance des fruits

Figure 43. Evolution de la teneur en eau et de la somme de températures nécessaire pour arriver au stade de Maturité physiologique, pour les différents scénarios A2, et Contrôle. Les traits bleu (Contrôle) et rouge (A2) montrent le cumul de températures (base 10°C) qui correspond à la croissance en biomasse des fruits, jusqu'à la maturité physiologique (limité dans ce cas à 1500°C.j), pour la situation actuel et le futur respectivement. Les traits rose (Contrôle) et orange (A2) représentent l'évolution de la teneur en eau (%) des fruits qui est en fonction du nombre de jours.

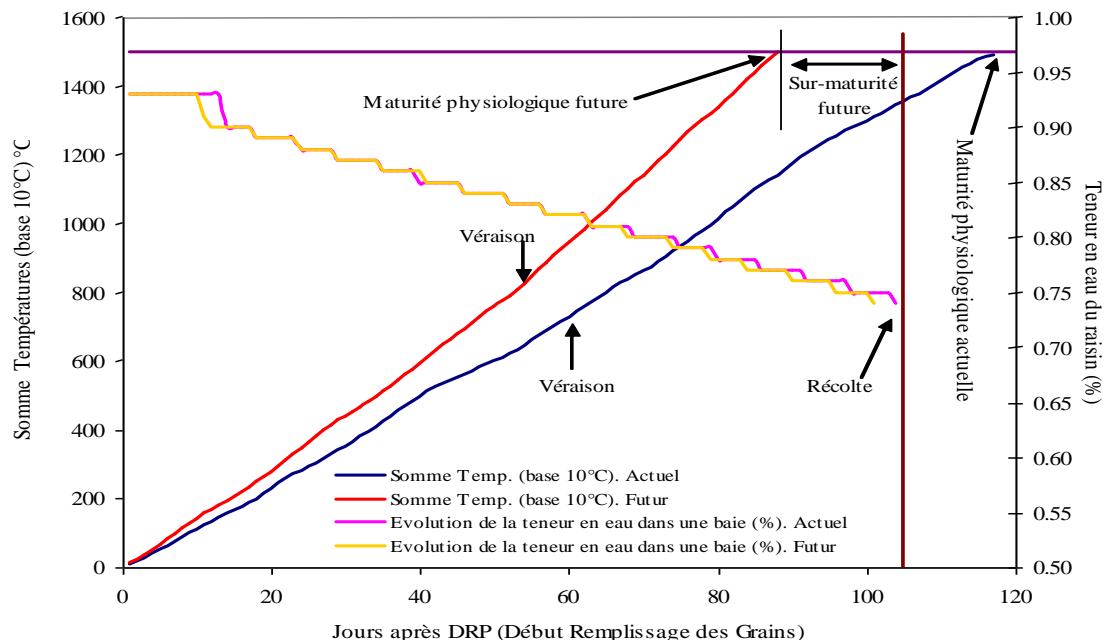
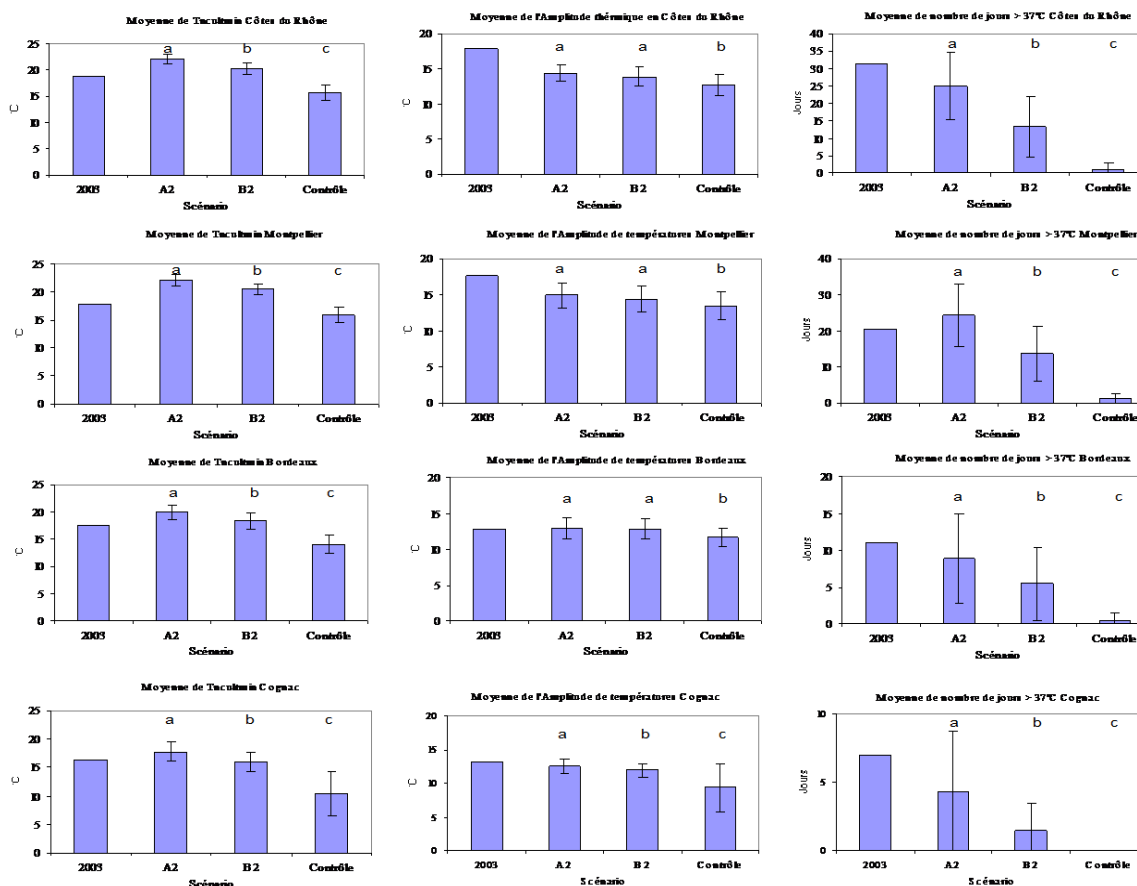


Figure 44-a. Evolution des variables climatiques observés dans la période véraison-récolte, pour les deux scénarios du futur, le scénario Contrôle, A2, B2 et l'année 2003. Les lettres représentent un test de différence de moyennes ($p < 0.05$). Les tests ont été réalisés pour chaque sol séparément.



dans le rapport source-puits. La demande des fruits est telle que le modèle donne toute la priorité de croissance aux fruits, ce qui empêche le LAI de croître.

4.4. La maturation du raisin

4.4.1. Impacts sur la teneur en eau (teneur en sucre)

Comme nous l'avons montré auparavant, la date de vendange est directement dépendante de la teneur en eau du raisin (ainsi que du cépage et de la région étudiée). Dans la partie traitant des impacts sur la phénologie, nous avons observé un avancement de la date de vendange. Dans tous les cas, à la même date on observe une teneur en eau plus faible (donc une plus forte teneur en sucre) et on note également que les conditions climatiques futures permettent de réaliser la vendange sans atteindre la date de récolte "butoir". Il faut remarquer que c'est dans le vignoble de Bourgogne que l'on observe la plus importante diminution de la teneur en eau (en fonction des scénarios) (Figure 42).

De plus, le modèle permet de déterminer le stade de maturité physiologique du fruit (cf. § I.2.1 et I.4). Ce stade correspond au plateau observé à la fin de la croissance en biomasse sèche des baies (Figure 7 cf. I.4). Au delà de ce stade, les variations du poids frais des baies sont dues à des variations de la quantité d'eau dans la baie. A partir de ces commentaires, on pourrait déterminer qu'au-delà de ce stade de maturité physiologique, le raisin est en "sur-maturation". L'étude de cette variable nous montre que dans le passé, la maturité physiologique était rarement atteinte (dans les régions de Côtes du Rhône, Languedoc et Bordeaux), voire jamais (cas de Champagne, Bourgogne, Anjou, Cognac), sauf pour l'année 2003 (année de la canicule en France). Par contre, dans le futur, ce stade de maturité physiologique pourrait être facilement atteint. Ainsi, la situation relative de la date de récolte (en fonction de la teneur en eau) et de la date de maturité (en fonction de l'accumulation de carbone) sont différentes de la situation actuelle. Cela peut nous laisser imaginer des situations de maturation complètement différentes de celles que l'on connaît actuellement (Figure 43). Cette situation pourrait devenir très fréquente dans le scénario B2 pour les régions des Côtes du Rhône, du Languedoc et de Bordeaux, avec les cépages actuels de chaque région. Dans le scénario A2, cette situation se généralise aussi au vignoble de Bourgogne.

Ces résultats confirment les commentaires de certains auteurs qui considèrent que la typicité des vins de chaque région pourra être modifiée à cause de l'augmentation de la fréquence d'épisodes de fortes températures, mais aussi par l'augmentation des températures minimales et leur possible effet négatif sur la synthèse d'arômes et polyphénols (Schultz, 2000 ; Lebon, 2002 ; INRA, 2004 ; Stock *et al.*, 2005 ; Jones *et al.*, 2005 a,b ; Duchêne et Schneider, 2005), traduit dans notre cas par un déséquilibre entre le cycle de l'eau et du carbone dans la baie.

4.4.2. Description des conditions thermiques de la culture au cours de la maturation du raisin

Nous avons réalisé une analyse des conditions thermiques de la culture, pour la période véraison-vendange. Pour cela, nous avons utilisé la variable température de culture simulée par le modèle. L'intérêt d'utiliser cette variable à la place de la température de l'air, est sa capacité à reproduire les différences qui peuvent être observées quand les conditions de culture sont modifiées (introduction d'irrigation, modifications des densités de plantations, introduction d'un mulch...). Trois variables climatiques ont été contrôlées dans la période véraison-vendange :

Figure 43-b. Evolution des variables climatiques observés dans la période véraison-vendange, pour les deux scénarios du futur, le scénario Contrôle, A2, B2 et l'année 2003. Les lettres représentent un test de différence de moyennes ($p < 0.05$). Les tests ont été réalisés pour chaque sol séparément.

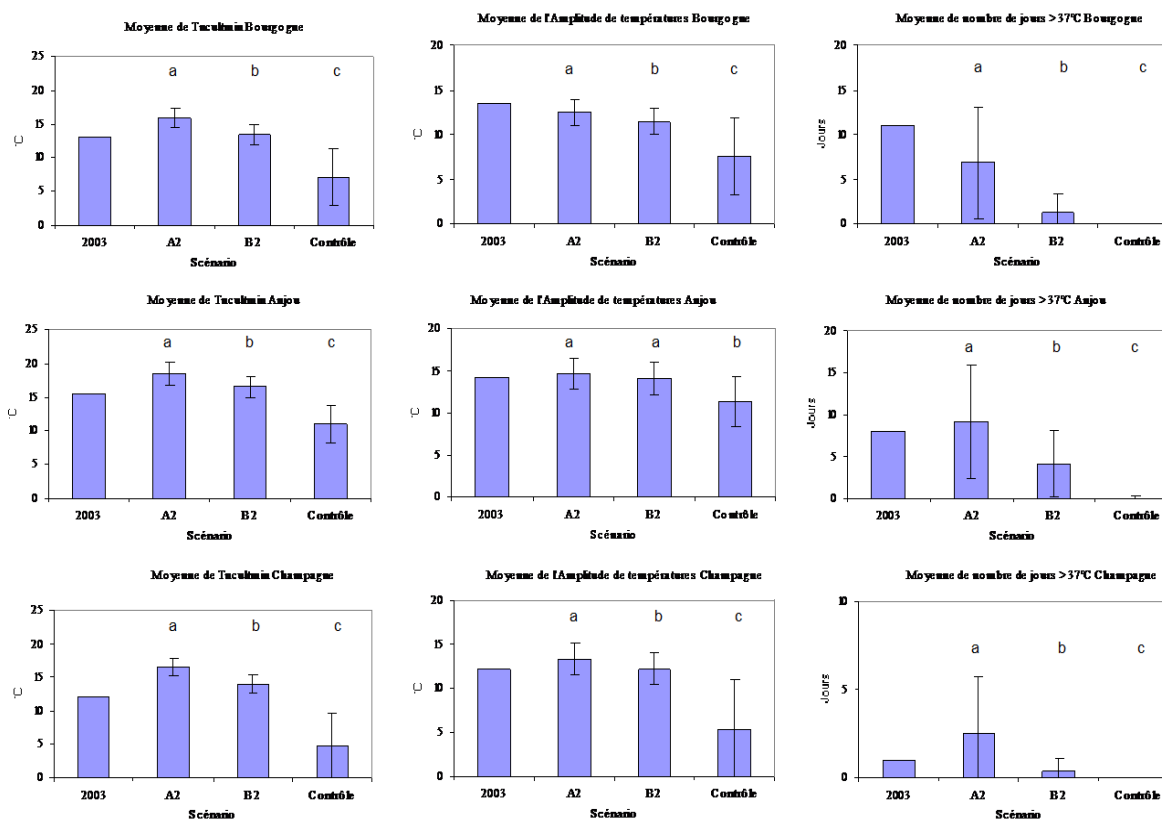


Tableau 37. Evolution de l'Indice de fraîcheur des Nuits (Tonietto, 1999, Carbonneau et Tonietto, 2001) dans les différents régions et pour les différents scénarios A2, B2 et Contrôle.

		Côtes du Rhône	Languedoc	Bordeaux	Cognac
A2	Indice de Fraîcheur des Nuits	Nuits Chaudes	Nuits Chaudes	Nuits Chaudes	Nuits Tempérées
B2		Nuits Chaudes	Nuits Chaudes	Nuits Chaudes	Nuits Tempérées
Contrôle		Nuits Tempérées	Nuits Tempérées	Nuits Tempérées	Nuits très fraîches

		Bourgogne	Anjou	Champagne
A2	Indice de Fraîcheur des Nuits	Nuits Tempérées	Nuits Chaudes	Nuits Tempérées
B2		Nuits fraîches	Nuits Tempérées	Nuits fraîches
Contrôle		Nuits très fraîches	Nuits fraîches	Nuits très fraîches

- ❖ le nombre de jours où la température de culture dépasse les 37°C (arrêt du stockage du sucre dans les fruits (Dokoolzian et Bergqvist, 2001)) ;
- ❖ l'amplitude moyenne des températures dans cette période qui est considérée comme importante pour la qualité (Fregoni et Pezzutto., 2000) ;
- ❖ et la moyenne des températures minimales de culture, qui pourrait se comparer avec l'indice de fraîcheur des nuits (IF) défini par Tonietto (1999) (calculé à partir de la température minimale de l'air), lequel souligne l'importance des températures fraîches nocturnes dans la synthèse d'anthocyanes et composants phénoliques (arômes) (Figure 44-a et 43-b) (Tonietto et Carbonneau, 1999).

Les résultats obtenus montrent une augmentation significative de l'amplitude des températures dans toutes les régions par rapport au scénario Contrôle (même si elle ne varie pas beaucoup pour les régions du Côtes du Rhône et Languedoc). Cette évolution est accentuée significativement dans le scénario A2 pour les régions de Cognac, Champagne et Bourgogne.

La température de culture minimale moyenne augmente de manière très importante, indépendamment du scénario et de la région : +4°C et +6°C pour les scénarios B2 et A2 respectivement dans les régions de Côtes du Rhône, Languedoc et Bordeaux ; +5°C et +7°C pour les scénarios B2 et A2 respectivement pour la région d'Anjou ; et +6°C et +8°C dans les régions de Cognac, Bourgogne et Champagne. Ces variations de la température minimale moyenne sont très importantes en relation avec l'avancement de la période véraison-recolte. Dans le scénario contrôle cette période a lieu pendant les mois d'août et septembre, alors que dans le futur cette période est avancée aux mois de juillet et août qui normalement présentent les températures les plus chaudes de l'année. L'augmentation de la température minimale moyenne pour cette période dépend également de la région, avec un plus fort impact dans les régions du Nord. D'autre part, si l'on tient compte de l'indice de fraîcheur des nuits IF (Tonietto, 1999 ; Tonietto et Carbonneau, 2001), on peut observer que toutes les régions montent d'une classe dans le scénario B2 et les régions de Bourgogne, Anjou et Champagne montent encore d'une classe dans le scénario A2. Dans les régions des Côtes du Rhône et du Languedoc, l'augmentation de la température minimale de cette période est tellement importante que l'on devrait presque envisager de créer une nouvelle classe (IH à nuits très chaudes +22°C), mais les différences par rapport la classe "Nuits chaudes" en termes d'impact sur la maturation ne seraient peut-être pas très importantes (Tableau 37).

Le nombre des jours supérieurs à 37°C augmente aussi, mais avec une intensité différente selon les régions et les scénarios. Ainsi, les régions de Côtes du Rhône et Languedoc pourraient avoir 25 jours dans le scénario A2 et 15 jours dans le scénario B2 ; Anjou et Bordeaux, 10 et 6 jours respectivement pour les scénarios A2 et B2 ; la Bourgogne aurait autour de 7 jours dans le scénario A2 et 1 jour dans le scénario B2 ; la Champagne autour de 3 jours dans le scénario A2. Si l'on compare les résultats issus de la simulation des scénarios du futur avec les résultats obtenus pour l'année 2003, celle-ci pourrait devenir une année type pour le scénario A2 dans les régions d'Anjou, Languedoc, Bordeaux, Bourgogne et Côtes du Rhône, même si pour ces deux dernières, la situation rencontrée en 2003 a été pire que les prévisions futures attendues par le modèle.

Figure 45. Evolution de l'indice IQ_{CLIMAT} pour les différents scénarios climatiques A2, B2 et Contrôle. Nous avons introduit la valeur de l'indice IQ_{CLIMAT} de l'année 2003, pour comparer les valeurs des scénarios A2 et B2 avec les valeurs de cette année considérée atypique. Les différences sont significatives dans tous les cas.

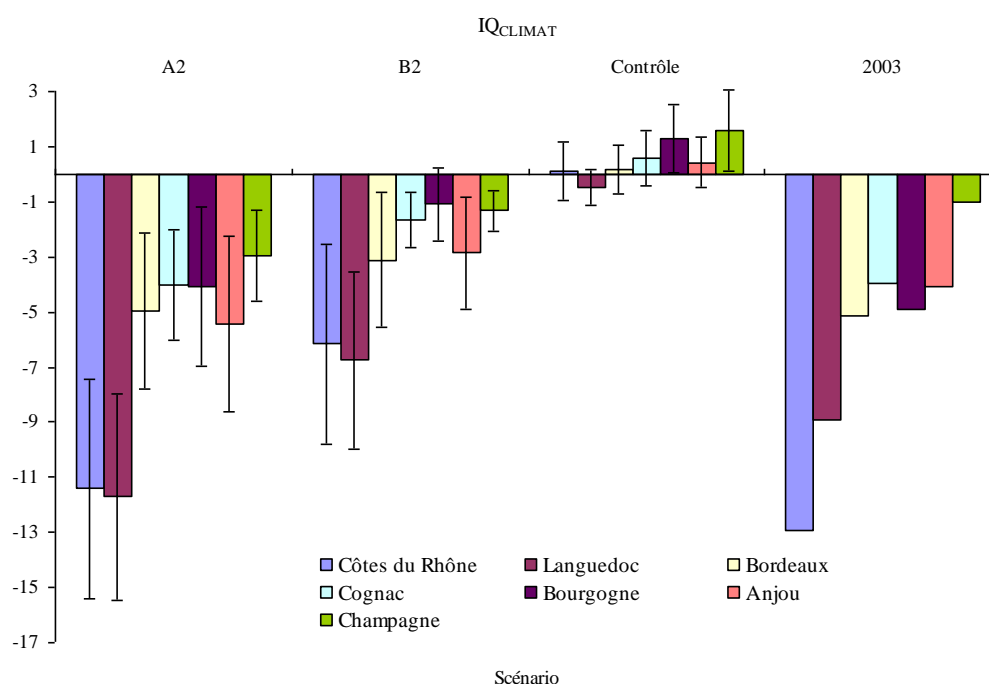


Tableau 38. Evolution des quantités de Carbone et Azote stockés dans le sol pour les différents scénarios (A2, B2 et Control). Les lettres représentent un test de différence de moyennes ($p < 0.05$). Les tests ont été réalisés pour chaque sol séparément.

Site	Sol	Variable	A2	B2	Contrôle
Côtes du Rhône	fRU	Moyenne Chumt (t/ha)	12 ^a	12 ^{ab}	12 ^a
		Écart-type de Chumt	1	1	1
	gRU	Moyenne Chumt (t/ha)	24 ^a	24 ^{ab}	24 ^a
		Écart-type de Chumt	2	2	2
Languedoc	fRU	Moyenne Chumt (t/ha)	29 ^a	29 ^a	29 ^a
		Écart-type de Chumt	3	3	3
	gRU	Moyenne Chumt (t/ha)	23 ^a	23 ^a	24 ^a
		Écart-type de Chumt	1	1	1
Bordeaux	Argile	Moyenne Chumt (t/ha)	12 ^a	12 ^a	12 ^a
		Écart-type de Chumt	1	1	1
	Graves	Moyenne Chumt (t/ha)	14 ^a	14 ^a	14 ^a
		Écart-type de Chumt	1	1	1
Cognac	Moyenne Chumt (t/ha)	34 ^a	34 ^a	35 ^a	
	Écart-type de Chumt	3	3	3	
Bourgogne	Moyenne Chumt (t/ha)	34 ^a	34 ^a	34 ^a	
	Écart-type de Chumt	2	2	3	
Anjou	fRU	Moyenne Chumt (t/ha)	10 ^a	10 ^a	10 ^a
		Écart-type de Chumt	1	1	1
	gRU	Moyenne Chumt (t/ha)	41 ^a	41 ^a	41 ^a
		Écart-type de Chumt	3	3	3
Champagne	Moyenne Chumt (t/ha)	69 ^a	70 ^a	69 ^a	
	Écart-type de Chumt	4	4	4	

4.4.3. Définition d'un indice de qualité climatique de la période de maturation

- *Description*

Afin de synthétiser ces informations climatiques pendant la période de maturation, nous avons créé un indice qui met en relation le nombre de jours où l'on dépasse $37^{\circ}\text{C}_{\text{culture}}$ et la température de culture minimale moyenne. Nous avons choisi de travailler sur ces deux variables, car elles pourraient avoir un rôle majeur sur la qualité dans le futur.

L'objectif de cet indice n'est pas de donner une valeur quantitative à la qualité d'une vendange, sinon simplement de montrer les possibles variations de qualité par rapport à ce qui est considéré comme une année excellente dans le climat actuel (en terme des conditions de maturation), et par conséquent de donner une idée de l'intensité du changement attendu dans l'avenir. Avec cet indice, il est donc possible de comparer entre eux, des scénarios, des combinaisons techniques, ou des séries d'années, par rapport à une situation de référence. Dans notre cas, les combinaisons techniques de l'année 2005 ont été choisies comme référence, car les conditions climatiques de la maturation de cette année ont été très bonnes (les vins de cette année ont souvent été classés comme excellents).

Pour la construction de l'indice, nous avons tenu compte de deux conditions : d'une part, l'effet tampon des fortes températures journalières (dans notre cas, traduit par le nombre de jours où la température est supérieure à $37^{\circ}\text{C}_{\text{culture}}$) sur le possible effet positif des températures minimales (Kliwer et Torres, 1972, Champagnol, 1984) ; d'autre part, nous avons considéré que le nombre de jours à plus de $37^{\circ}\text{C}_{\text{culture}}$ avait un impact plus important sur la maturation que la température minimale de culture (rapport 0.7 à 0.3) (Dokoolzian et Bergqvist, 2001). L'indice, qui correspond à un indice moyen sur l'ensemble des années du scénario considéré, est calculé de la façon suivante (Équation 23) :

Équation 23
$$IQ_{\text{CLIMAT}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N -0.3 \ln \left(\frac{e^{TCULTMIN_n}}{e^{TCULTMIN_{05}}} \right) - 0.7 \ln \left(\frac{e^{NBJ_{\text{sup}37_n}}}{e^{NBJ_{\text{sup}37_{05}}}} \right)$$

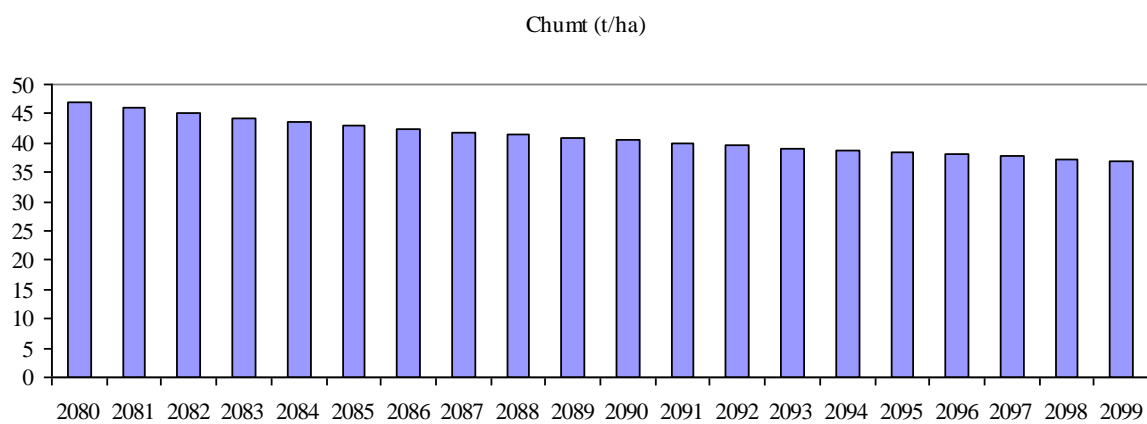
où $TCULTMIN_n$ est la température de culture minimale moyenne de l'année n , $TCULTMIN_{05}$ est la température de culture minimale moyenne en 2005, $NBJ_{\text{sup}37_n}$ est le nombre de jours où la température de culture dépasse $37^{\circ}\text{C}_{\text{culture}}$ l'année n . Toutes les valeurs correspondent à la période véraison – vendange.

- *Résultats de l'utilisation de cet indice*

Les résultats des valeurs de cet indice sont montrés dans la Figure 45. On observe une forte modification des conditions de maturité dans toutes les régions et elle est intensifiée dans les deux scénarios étudiés. La modification la plus importante des conditions générales est rencontrée dans les régions des Côtes du Rhône et du Languedoc. Une comparaison avec les valeurs de l'indice IQ_{climat} de l'année 2003 (Figure 45) montre que les conditions futures annuelles seront très proches de celles observées l'année citée.

Tous ces résultats montrent les importantes modifications que vont subir la qualité de la récolte et les conditions de maturation, soit par conséquent la typicité des vins dans les différentes régions de l'étude, par rapport à la structure actuelle des différents vignobles (densités de plantation, hauteur du feuillage, techniques culturales). Cet indice sera utilisé par la suite pour étudier les stratégies d'adaptation du vignoble, afin d'essayer de minimiser les modifications des conditions de maturation.

Figure 46. Evaluation au cours du temps du stockage de carbone dans le humus (fractions active et inerte) dans le sol (Chumt (t/ha)) pour le scénario Contrôle La tendance est la même pour les autres scénarios et les différents sites.



4.5. Environnement

Le modèle permet aussi d'étudier les stockages de carbone de l'humus (fractions active et inerte) dans le sol (variable CHUMT (t/ha)). Cette valeur nous permet de contrôler le niveau de fertilité de notre sol. Dans notre cas, le modèle décrit bien les différences de stockage entre les différents sols des différentes régions (Tableau 38). En règle générale, on observe une diminution de la quantité des stocks au cours du temps (Figure 46). Cependant, il n'y a pas beaucoup de variation entre la situation actuelle et la situation future (diminution d'environ 1%). Ceci nous permet d'affirmer que si l'on considère les scénarios utilisés et les itinéraires techniques appliqués, les niveaux de fertilité des différentes régions et de leurs sols seront maintenus. Néanmoins, il faut rappeler que dans notre étude, nous n'avons pas inclus de travail du sol dans les itinéraires techniques. Cela aurait pu modifier ces valeurs, à cause d'une meilleure minéralisation de la matière organique dans les premières couches. Dans une récente étude sur les impacts du changement climatique sur les effets du tassement du sol (pour les grandes cultures), il a été observé dans toutes les situations une augmentation de la quantité de carbone stockée dans le sol (Moulin, 2006). Si l'on applique ces résultats au contexte viticole, dans les parcelles où sont réalisés actuellement des apports de matière organique (broyage de sarments), en combinant cela à un travail du sol, la fertilité du sol des parcelles pourrait augmenter (et donc avoir un impact sur la vigueur des plantes).

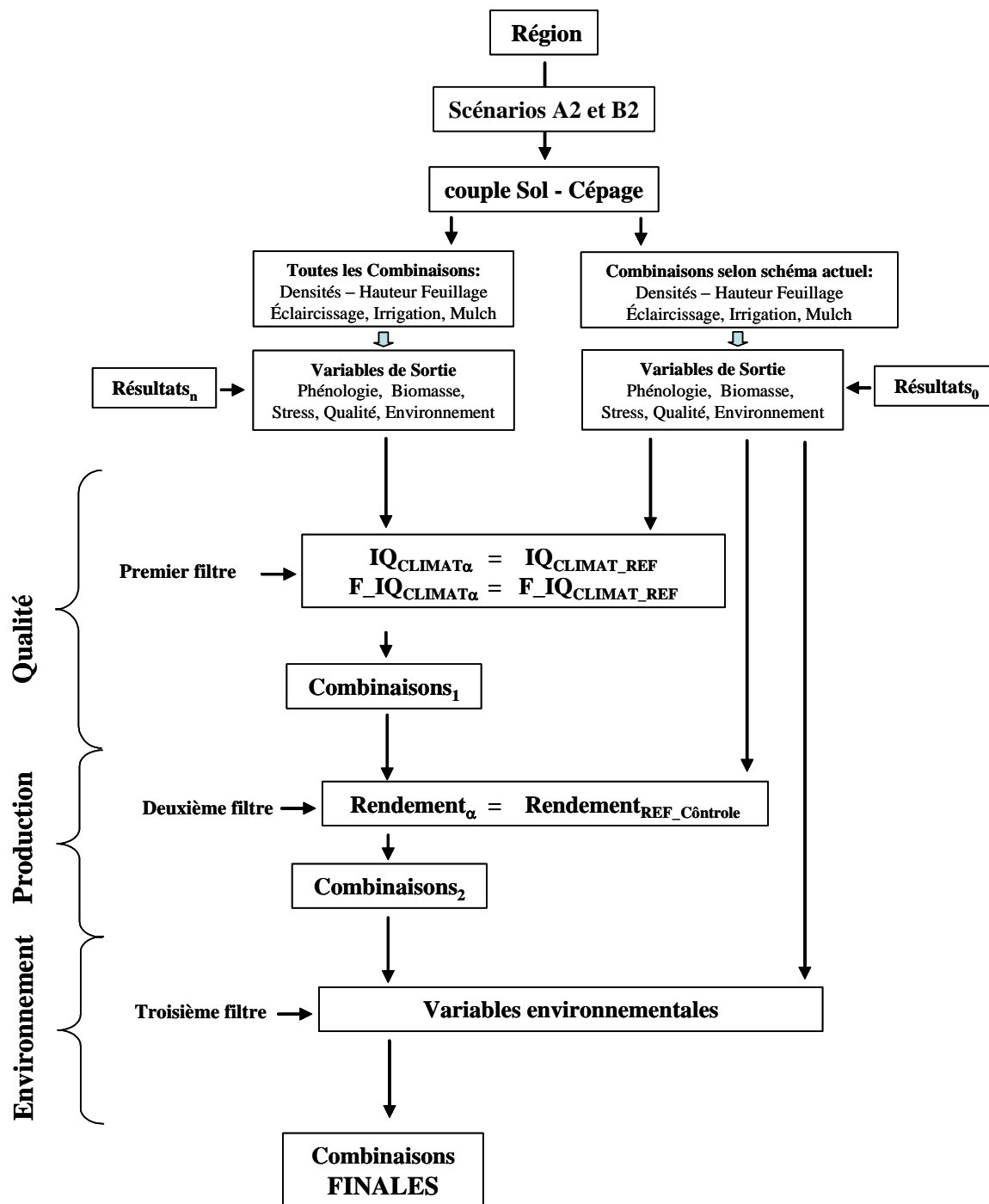
4.6. Résumé des principaux résultats

La phénologie de la vigne va être fortement avancée dans toutes les régions et certaines périodes vont être fortement raccourcies (surtout la période floraison-véraison). Cette modification du climat permettrait même l'implantation du cépage Syrah dans pratiquement toutes les régions de France, avec une production d'un degré équivalent à celui recherché dans ses régions d'origine. Ces résultats confirment ceux des travaux cités auparavant.

La situation hydrique au début du cycle sera meilleure qu'actuellement (en règle générale), ce qui va favoriser la croissance végétative. Le stress hydrique va augmenter dans toutes les régions à la fin du cycle de la plante. L'évolution du stress azoté n'est pas si évidente que celle du stress hydrique. Les seules régions dans lesquelles on observe une augmentation des stress azotés sont les régions de Bourgogne, Anjou et Champagne, en liaison avec l'importante demande d'azote par la plante pour sa croissance.

La production de biomasse végétative augmente dans toutes les régions de France, avec différents niveaux d'intensité. Ceci est lié en partie à l'augmentation de la capacité de mise en place des réserves. En revanche les rendements suivent des tendances différentes selon les régions : ils vont être augmentés dans certaines régions de Bourgogne, de Champagne et de Cognac ; ils sont limités dans les régions de Bordeaux et Anjou; et ils vont diminuer dans les régions du Languedoc et des Côtes du Rhône. Cette diminution des rendements est due au dépassement des seuils de production optimale, à l'augmentation des stress hydriques en fin du cycle, au raccourcissement du cycle (surtout pour la période floraison-véraison), aux fortes températures (supérieures à 37°C), ainsi qu'à une forte concurrence entre la partie végétative et le grain du raisin (favorisée par le CO₂ et par la diminution du stress hydrique au début du cycle). La production de surface foliaire va être très dépendante de la région, du type du sol et de la concurrence entre les feuilles et les fruits.

Figure 47. Schéma de la méthodologie utilisée pour étudier les possibles stratégies d'adaptation des différentes régions.



Les conditions climatiques de la période de maturation du raisin vont être complètement modifiées dans toutes les régions (avec plus ou moins d'intensité). L'indice IQ_{Climat} représente bien la variation des conditions climatiques de la période de maturation, et les résultats montrent de fortes modifications dans le futur, accentuées pour le scénario A2 dans toutes les régions. Cela va modifier sans aucun doute la typicité des vins des différentes régions, telle que cette typicité pourrait être définie aujourd'hui.

5. Etude pour la proposition de stratégies d'adaptation au changement climatique dans les différents vignobles de l'étude

Nous avons présenté dans la partie précédente une large prévision des impacts, selon la structure technique actuelle de chaque vignoble. Les modifications attendues sont très importantes, en terme de production, mais aussi et surtout en terme de conditions de maturation.

L'objectif de cette partie est d'étudier les possibles stratégies d'adaptation des techniques et des variétés, pour essayer de diminuer les impacts négatifs du changement climatique sur la production et la qualité, et qu'elles soient les plus proches possibles de la situation actuelle de chaque vignoble.

5.1. Méthodologie développée

Pour étudier les différentes stratégies d'adaptation, nous avons mis en place une méthodologie d'analyse des résultats obtenus, pour toutes les combinaisons de simulation décrites dans le Tableau 26. Nous avons défini auparavant quelques conditions pour leur analyse :

- ❖ cette méthodologie est appliquée dans chaque région séparément ;
- ❖ à l'intérieur de chaque région, nous avons fait des couples *sol-cépage* (avec la variété typique et la Syrah, et avec les deux sols lorsque c'est possible) ;
- ❖ nous avons tenu compte des deux scénarios ensemble pour les possibles améliorations, car dans tous les cas, les modifications retenues pour le scénario B2 étaient aussi nécessaires pour le scénario A2 et vice-versa. De plus, si dans le futur le climat se trouve dans les conditions du scénario A2, il aura dû se trouver transitoirement dans celles du scénario B2 ;
- ❖ le critère utilisé dans cette méthodologie est basé sur l'élimination des situations qui ne permettent pas une amélioration, ou au moins la conservation, des conditions de production et de maturation obtenues avec les structures de base ;
- ❖ cette structure de base de chaque vignoble est la même qui a été utilisée dans l'étude précédente (Tableau 31) (Chapitre IV.4).

5.1.1. Description de la méthodologie

La **Qualité** est le premier critère utilisé pour étudier les possibles modifications techniques à réaliser (Figure 47). Nous avons considéré que le premier intérêt de l'exploitation était d'améliorer les conditions de la période de maturation, pour ainsi améliorer la qualité du produit final. Les impacts

décrits auparavant sur les conditions de maturité, montraient une très forte modification de cette période, dans pratiquement toutes les régions.

Pour choisir plus facilement les techniques qui pourraient améliorer ces conditions, nous avons utilisé l'indice IQ_{CLIMAT} (cf. III.4.4.3.). Ainsi, cet indice a été calculé pour toutes les années de chaque scénario, et pour chaque combinaison technique. Nous avons obtenu deux informations de ce calcul : la valeur moyenne sur toutes les années de l'indice IQ_{CLIMAT} de chaque combinaison technique (IQ_{CLIMAT_α}) (Équation 24 et Équation 25) ; et la fréquence d'années ($F_{IQ_{CLIMAT_\alpha}}$) (Équation 26) où la valeur d' IQ_{CLIMAT} de l'année n est supérieure à celle de l' IQ_{CLIMAT} moyen calculé sur la même série d'années avec la combinaison technique de base (soit IQ_{CLIMAT_REF} , qui a été calculé selon Équation 23) (cette fréquence permettant de tenir compte de la variabilité interannuelle).

$$\text{Équation 24} \quad IQ_{CLIMAT_{\alpha n}} = -0.3 \ln \left(\frac{e^{TCULTMIN_{n\alpha}}}{e^{TCULTMIN_{05\alpha}}} \right) - 0.7 \ln \left(\frac{e^{NBJ_{sup37n\alpha}}}{e^{NBJ_{sup3705\alpha}}} \right)$$

$$\text{Équation 25} \quad IQ_{CLIMAT_\alpha} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N IQ_{CLIMAT_{\alpha n}}$$

$$si \quad IQ_{CLIMAT_{\alpha n}} \leq IQ_{CLIMAT_{REF}} \quad alors \quad F_{IQ_{CLIMAT_{\alpha n}}} = 0$$

$$\text{Équation 26} \quad si \quad IQ_{CLIMAT_{\alpha n}} > IQ_{CLIMAT_{REF}} \quad alors \quad F_{IQ_{CLIMAT_{\alpha n}}} = 1$$

$$F_{IQ_{CLIMAT_\alpha}} = \sum_{n=1}^N F_{IQ_{CLIMAT_{\alpha n}}}$$

où, $TCULTMIN_{n\alpha}$ et $TCULTMIN_{05\alpha}$ sont les températures de culture minimales moyennes de des années n et 2005 respectivement, pour une combinaison technique α , et NBJ_{sup37n} est le nombre de jours où la température de culture dépasse $37^\circ C_{culture}$ durant cette année n , pour la même combinaison α . En ce qui concerne le critère d'utilisation de ces indices, les combinaisons techniques retenues correspondent donc à celles qui ont une valeur de IQ_{CLIMAT_α} et de $F_{IQ_{CLIMAT_\alpha}}$ supérieure ou égale à la valeur de ces deux variables calculées avec la combinaison technique de base.

Le deuxième critère est la **production du rendement**. De toutes les combinaisons techniques retenues dans l'étape précédente, nous étudions celles qui permettent d'améliorer la production, ou de la maintenir au même niveau que l'actuelle. Ainsi, on calcule la valeur du rendement moyen sur toutes les années pour la combinaison technique de base dans le scénario Contrôle et ensuite, les valeurs des rendements moyens sur toutes les années des différentes combinaisons techniques retenues sur les scénarios A2 et B2 sont comparées afin de choisir la meilleure ou les meilleures d'entre elles (Équation 27).

$$\text{Équation 27} \quad RENDEMENT_{\alpha_S} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N RENDEMENT_{n\alpha_S}$$

$$RENDEMENT_{REF_Contrôle} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N RENDEMENT_{nREF_Contrôle}$$

où $RENDEMENT_{\alpha n, S}$ est la valeur du rendement obtenu pour la série climatique S (A2 ou B2), pour la combinaison technique α et l'année n ; et $RENDEMENT_{REF n, Contrôle}$ est la valeur du rendement obtenu pour l'année n , la combinaison technique de base et avec la série climatique Contrôle.

Tableau 39. Valeurs des différents variables, selon la nouvelle structure retenue et en comparaison avec les valeurs de base pour la région de Côtes du Rhône.

		Sol	Structure Choisie	Structures comparés	Scénarios	F_IQ _{CLIMAT}	IQ _{CLIMAT}	Rendement (t/ha)	LAI (m ² /m ²)	Stress Hydrique	Stress Azoté	Irrigation (mm)	Sur-maturité
Côtes du Rhône	Grenache	fRU	3333ceps/ha, 1.0m feuillage, Sans Irrigation, éclaircissage libre, sans mulch	Structure de Base	Contrôle			7.8	2.1	0.65	0.66		
					A2	12	-11	4.75	2.1	0.58	0.71		
					B2	17	-6	5.7	2.1	0.60	0.70		
		gRU	3333ceps/ha, 1.5m feuillage, Irrigation, éclaircissage libre, sans mulch	Nouvelle Structure	A2	17	-10.4	6	2	0.68	0.74	93	oui
					B2	19	-5	7.2	2	0.69	0.72	84	oui
					Contrôle			11.4	2.6	0.97	0.75		
	Syrah	fRU	3333ceps/ha, 1.0m feuillage, Sans Irrigation, éclaircissage libre, sans mulch	Structure de Base	A2	17	-11	7.4	2.4	0.96	0.8		
					B2	19	-6	8.9	2.4	0.97	0.78		
					Contrôle			11.4	2.6	0.97	0.75		
		gRU	3333ceps/ha, 1.5m feuillage, Sans Irrigation, éclaircissage libre, sans mulch	Nouvelle Structure	A2	17	-9.6	8.3	2.4	0.94	0.82		oui
					B2	20	-4.3	9.7	2.5	0.94	0.8		oui
					Contrôle			11.4	2.6	0.97	0.75		
	Syrah	fRU	3333ceps/ha, 1.0m feuillage, Sans Irrigation, éclaircissage libre, sans mulch	Structure de Base	A2	10	-11	5.1	2.1	0.59	0.71		
					B2	12	-6	6	2.1	0.60	0.69		
					Contrôle			7.7	2.1	0.63	0.64		
		gRU	3333ceps/ha, 1.5m feuillage, Irrigation, éclaircissage libre, sans mulch	Nouvelle Structure	A2	13	-11	6.2	2.1	0.68	0.74	87	oui
					B2	16	-6	7.4	2.1	0.69	0.72	79	oui
					Contrôle			11.3	2.6	0.98	0.73		
gRU	3333ceps/ha, 1.0m feuillage, Sans Irrigation, éclaircissage libre, sans mulch	Structure de Base	A2	14	-11	7.5	2.5	0.96	0.81				
			B2	15	-6	8.7	2.5	0.97	0.79				
			Contrôle			11.3	2.6	0.98	0.73				
gRU	3333ceps/ha, 1.5m feuillage, Sans Irrigation, éclaircissage libre, sans mulch	Nouvelle Structure	A2	16	-10	8.4	2.5	0.93	0.82		oui		
			B2	16	-5.2	9.5	2.5	0.94	0.81		oui		
			Contrôle			11.3	2.6	0.98	0.73				

Enfin, différentes variables environnementales (eau d'irrigation nécessaire, périodes d'irrigation) et physiologiques (niveaux de stress de la plante) sont contrôlées afin de déterminer si la nouvelle structure technique est vraiment justifiée.

L'analyse des stratégies et leur justification sont présentées pour chaque région séparément.

5.2. Stratégies évaluées dans chaque région

Nous décrivons par la suite les différentes stratégies (les combinaisons techniques) pour chacune des régions viticoles et les raisons par lesquelles ont été choisies.

A la fin de cette analyse par région, nous allons montrer une carte avec un résumé des modifications proposées dans chacune des régions, afin d'avoir une vision plus globale de l'ensemble des résultats obtenus.

5.2.1. Région des Côtes du Rhône Méridionales

Dans la région des Côtes du Rhône, nous avons observé une forte modification des conditions climatiques pendant la maturation du raisin dans les deux scénarios étudiés, et avec les conditions de culture actuelles. Cette modification est considérée trop importante pour pouvoir être corrigée juste par l'adaptation de la structure de la parcelle et des techniques à appliquer. Cependant, dans certains cas, la modification de certaines techniques permettrait d'atténuer les impacts.

La structure de conduite qui s'avère la plus intéressante dans toutes les situations testées est la densité de plantation de 3030 cep/ha avec 1.5 m de hauteur de feuillage. Cette structure permet d'améliorer les critères de qualité ($IQ_{CLIMAT\alpha}$ et $F_{IQ_{CLIMAT\alpha}}$). Cette structure n'agit pas de la même façon selon les cépages ni les scénarios. Ainsi, dans le cas du scénario B2, l'utilisation de cette structure améliore nettement les valeurs de IQ_{CLIMAT} pour les parcelles de Grenache (surtout dans le sol à gRU) et un peu pour les parcelles de Syrah. Cette amélioration est atténuée dans le scénario A2. Les valeurs de l'indice IQ_{CLIMAT} sont toujours meilleures dans les parcelles gRU. Ceci montre que les parcelles qui, aujourd'hui, montrent des effets négatifs sur la qualité à cause de très fortes vigueurs, pourraient être favorisées dans les situations futures.

L'utilisation de l'irrigation paraît indispensable dans les sols avec fRU pour l'amélioration des conditions de maturation, contrairement aux parcelles à gRU où l'irrigation n'apporte pas d'effet positif supplémentaire. Plusieurs éléments sont à souligner :

- ❖ L'irrigation ne permet pas de maintenir les niveaux de production actuels. Cela montre que l'effet négatif des fortes températures (dépassement de l'optimum de croissance), ainsi que le raccourcissement du cycle de croissance des fruits, ne peuvent pas être minimisés par la simple introduction de l'irrigation.
- ❖ L'utilisation de l'irrigation permet de gérer l'augmentation de la hauteur du feuillage et de diminuer les niveaux de stress hydrique. La quantité d'eau d'irrigation nécessaire dans les sols fRU est d'environ 90 mm pour le scénario A2 et 80 mm pour le scénario B2. La période d'irrigation commence à la fin du mois de juin, et elle s'étend jusqu'à la fin du mois d'août.

L'utilisation du mulch ne s'avère pas déterminante dans aucun des cas retenus. Son utilisation reste donc déconseillée (augmentation du coût d'exploitation).

Tableau 40. Valeurs des différents variables, selon la nouvelle structure retenue et en comparaison avec les valeurs de base pour la région de Languedoc.

		Sol	Structure Choisie	Structures comparés	Scénarios	F_IQ _{CLIMAT}	IQ _{CLIMAT}	Rendement (t/ha)	LAI (m ² /m ²)	Stress Hydrique	Stress Azoté	Irrigation (mm)	Sur-maturité
Languedoc	Grenache	fRU	3333ceps/ha, 1.0m feuillage, Sans irrigation, éclaircissage libre, sans mulch	Structure de Base	Contrôle			5	1.2	0.38	0.64		
					A2	14	-12	4.2	1.3	0.36	0.7		
					B2	15	-7	4.6	1.3	0.36	0.67		
		gRU	3333ceps/ha, 1.5m feuillage, Irrigation, éclaircissage libre, sans mulch	Nouvelle Structure	A2	17	-10	6.3	1.6	0.60	0.7	143	oui
					B2	18	-5	7.2	1.7	0.60	0.69	143	oui
					Contrôle			6.7	1.6	0.54	0.63		
	Syrah	fRU	3333ceps/ha, 1.0m feuillage, Sans irrigation, éclaircissage libre, sans mulch	Structure de Base	A2	17	-12	4.7	1.7	0.50	0.67		
					B2	16	-7	5.4	1.7	0.50	0.66		
					Contrôle			6.7	1.6	0.54	0.63		
		gRU	3333ceps/ha, 1.5m feuillage, Irrigation, éclaircissage libre, sans mulch	Nouvelle Structure	A2	17	-9.7	6.2	1.8	0.50	0.68	100	oui
					B2	18	-5	7.1	1.8	0.50	0.67	95	oui
					Contrôle			6.7	1.6	0.54	0.63		
Syrah	fRU	3333ceps/ha, 1.0m feuillage, Sans irrigation, éclaircissage libre, sans mulch	Structure de Base	A2	12	-12	4.4	1.4	0.37	0.70			
				B2	9	-7	4.7	1.3	0.37	0.67			
				Contrôle			6.6	1.7	0.53	0.62			
	gRU	3333ceps/ha, 1.5m feuillage, Irrigation, éclaircissage libre, sans mulch	Nouvelle Structure	A2	19	-10.2	6.5	1.7	0.60	0.7	129	oui	
				B2	15	-6.4	7.3	1.7	0.60	0.68	131	oui	
				Contrôle			6.6	1.7	0.53	0.62			
Syrah	fRU	3333ceps/ha, 1.0m feuillage, Sans irrigation, éclaircissage libre, sans mulch	Structure de Base	A2	13	-12	4.9	1.7	0.50	0.67			
				B2	12	-7	5.4	1.7	0.50	0.65			
	gRU	3333ceps/ha, 1.5m feuillage, Irrigation, éclaircissage libre, sans mulch	Nouvelle Structure	A2	21	-10	6.4	1.8	0.50	0.68	92	oui	
				B2	15	-6.2	7.3	1.8	0.50	0.66	91	oui	

L'éclaircissage n'a pas d'impact sur les conditions de maturation, mais seulement sur les rendements finaux, donc la gestion reste libre.

Le LAI ne montre de variations importantes dans aucun des cas, même si l'on augmente la hauteur du feuillage. Nous avons contrôlé que le modèle simule bien une différence de LAI dans les conditions actuelles (données non montrées) entre une structure avec 1m de hauteur de feuillage et une autre avec 1.5 m. Cependant les résultats obtenus pour le futur ne montrent pas cette différence entre les deux structures choisies, puisque ce sont avant tout les stress hydrique et thermique observés sur ces scénarios futurs qui seront limitant de la croissance foliaire, et non plus la structure du feuillage.

Une analyse du comportement des deux cépages dans ces conditions montre que le cépage Grenache présente une meilleure adaptation aux modifications proposées, contrairement à la Syrah. Cela s'explique par les différences de cycle phénologique, car dans notre cas, nous n'avons pas pris en compte les différences d'adaptabilité des différents cépages à la sécheresse, via leur différente efficacité d'utilisation de l'eau (Bota *et al.*, 2001 ; Medrano *et al.*, 2005) ou via le porte-greffe (Ollat *et al.*, 2003). Si l'on tient compte de la capacité d'adaptation à la sécheresse du Grenache (Ojeda *et al.*, 2005), contrairement à la Syrah, l'introduction d'un paramétrage spécifique à chaque variété décrivant leur fonctionnement hydrique pourrait accentuer la réponse de chacun (positive ou négative) déjà montrée par le modèle.

Les deux cépages seront confrontés à des problèmes fréquents de sur-maturité (atténués dans le cas de la cépage Syrah dans le scénario B2), selon la définition que nous avons montrée dans le chapitre IV.4.1.4 (date de récolte simulée plus tardive que la date de maturation).

Le Tableau 39 montre les valeurs attendues pour chacune des variables contrôlées, en prenant en compte les différentes modifications énoncées ci-dessus.

5.2.2. Région du Languedoc

Dans la région du Languedoc, de fortes modifications sont attendues dans tous les aspects, la production, la qualité et l'environnement. La période de maturation du raisin présente aussi de fortes modifications par rapport à la situation actuelle (IQ_{CLIMAT} égal à -12 pour le scénario A2 et égal à -7 pour le scénario B2). De la même façon que pour la région des Côtes du Rhône, la modification des conditions climatiques est tellement importante que l'adaptation des techniques culturales et de la structure de plantation ne suffit pas pour atténuer complètement les impacts du changement climatique. Néanmoins, nous avons obtenu par notre analyse quelques combinaisons qui pourraient permettre de baisser ces impacts. Ainsi, de même que dans la région des Côtes du Rhône, la structure de conduite qui apparaît comme la plus intéressante est la densité de plantation de 3030 cep/ha avec 1.5 m de hauteur de feuillage. Cette structure permet de diminuer la valeur des critères de qualité. Les tendances pour les deux cépages et les deux scénarios étudiés sont les mêmes que dans la région des Côtes du Rhône : dans le scénario B2, cette structure améliore nettement les valeurs de IQ_{CLIMAT} pour les parcelles de Grenache et pas beaucoup dans les parcelles avec la cépage Syrah. Cette amélioration est atténuée dans le scénario A2.

L'utilisation de l'irrigation paraît indispensable dans les deux sols étudiés, que ce soit le sol à fRU ou à gRU. Dans les deux cas, l'irrigation apporte une amélioration des conditions de maturation. Contrairement à la région des Côtes du Rhône, le sol gRU ne présente pas des valeurs de l'indice IQ_{CLIMAT} très différentes de celles du sol fRU (avec l'irrigation). Plusieurs éléments sont à souligner :

Tableau 41. Valeurs des différents variables, selon la structure retenue pour la région de Bordeaux. Dans cette région, nous avons montré que la structure actuelle était la plus adaptée aux modifications futures.

		Sol	Structure	Structures comparés	Scénarios	F_IQ _{CLIMAT}	IQ _{CLIMAT}	Rendement (t/ha)	LAI (m ² /m ²)	Stress Hydrique	Stress Azoté	Irrigation (mm)	Sur-maturité
Bordeaux	Merlot	Argiles	5000ceps/ha, 1.3m feuillage Sans Irrigation, Eclaircissage libre, Sans mulch	Structure de Base	Contrôle			18.1	1.75	0.98	0.65		
					A2	14	-5	18.9	2.2	0.96	0.7	-	oui
					B2	13	-3	19	2.1	0.95	0.69	-	oui
		Graves		Structure de Base	Contrôle			17.6	1.7	0.95	0.66		
					A2	14	-5	17.8	2	0.92	0.67	-	oui
					B2	13	-3	18.1	1.9	0.91	0.67	-	oui
	Syrah	Argiles	5000ceps/ha, 1.3m feuillage Sans Irrigation, Eclaircissage libre, Sans mulch	Structure de Base	Contrôle			12.7	3.6	0.96	0.68		
					A2	15	-4.7	12.1	3.8	0.9	0.76	-	non
					B2	12	-3	12.4	3.7	0.91	0.73	-	non
		Graves		Structure de Base	Contrôle			12.4	3.4	0.91	0.67		
					A2	15	-5	11.7	3.5	0.86	0.71	-	non
					B2	12	-3	12	3.5	0.86	0.7	-	non

- ❖ L'effet de l'irrigation sur la production est différent selon les scénarios : elle entraîne une légère perte de rendement pour le scénario A2 et une légère augmentation pour le scénario B2. Dans ce cas, et contrairement à la situation observée en Côtes du Rhône, la réponse de la plante au dépassement de l'optimum de températures et du raccourcissement du cycle, est compensée par l'introduction de l'irrigation.
- ❖ L'irrigation permet aussi de gérer l'augmentation de la hauteur du feuillage et de diminuer les niveaux de stress hydrique. L'irrigation permet aux sols à fRU de ne pas arriver à des niveaux de stress hydrique critiques pour la croissance de la plante (valeur de SWFAC = 0.35).
- ❖ La quantité d'eau d'irrigation nécessaire dans les sols fRU est d'environ 140 mm pour les scénarios A2 et B2 ; et de 100 mm pour les sols gRU (dans les deux scénarios). La période d'irrigation déterminée par le modèle est différente selon les scénarios : pour le scénario A2 elle commence au début du mois de juin, et elle s'étend jusqu'à la fin du mois d'août ; et pour le scénario B2, elle commence à la mi-mai et elle termine à la fin du mois d'août.

Dans cette région, le LAI ne présente pas non plus de fortes variations, comme nous l'avons observé dans la région de Côtes du Rhône. Les raisons de ce comportement sont les mêmes que celles énoncées auparavant (cf.III.14.2.1.).

Le comportement des deux cépages par rapport à l'adaptabilité et aux problèmes de "sur-maturité", est similaire à celui observé dans la région de Côtes du Rhône.

De même que dans la région des Côtes du Rhône, l'utilisation du mulch n'est pas conseillée car elle ne modifie pas les conditions de production ni de la qualité. L'éclaircissage a un impact seulement sur les rendements finaux.

Le Tableau 40 montre les valeurs attendues pour chacune des variables contrôlées, en prenant en compte les différentes modifications énoncées ci-dessus.

5.2.3. Région de Bordeaux

Dans la région de Bordeaux, l'analyse des stratégies ne montre pas de modifications significatives par rapport à la structure de base utilisée actuellement. Ainsi, en terme de qualité, les différentes combinaisons testées ne montrent pas de fortes améliorations par rapport aux valeurs des critères de référence. Néanmoins, quelques combinaisons montrent des résultats intéressants à analyser.

Les conditions de maturation calculées de l'indice IQ_{CLIMAT} ne montrent pas de différences entre la structure 3333 ceps/ha avec 1.5m de hauteur du feuillage (3333/1.5) et la structure 5000 ceps/ha avec 1.3m (5000/1.3). Par contre, la structure (3333/1.5) diminue d'une manière importante les rendements, en comparaison avec la production actuelle (environ 4t/ha pour le cépage Merlot et 3t/ha pour le cépage Syrah), contrairement à la structure (5000/1.3). De plus, cette diminution du rendement n'est pas suivie d'une amélioration des conditions de la maturation, ni de la qualité. Les différents sols étudiés ne montrent pas d'amélioration significative avec l'introduction de nouvelles structures de plantation. De même, l'analyse montre que ni l'irrigation, ni l'introduction d'un mulch, n'apportent de modifications significatives sur la qualité ou la production.

Les deux cépages étudiés (Merlot et Syrah) montrent un comportement similaire par rapport à la qualité et à la production. Par contre, la Syrah présente moins d'impact des possibles effets de "sur-maturité" que le Merlot.

Tableau 42. Valeurs des différents variables, selon la nouvelle structure retenue et en comparaison avec les valeurs de base pour la région de Cognac.

	Sol	Nouvelle Structure	Structures comparés	Scénarios	F_IQ_{CLIMAT}	IQ_{CLIMAT}	Rendement (t/ha)	LAI (m²/m²)	Stress Hydrique	Stress Azoté	Irrigation (mm)	Sur-maturité
Cognac	Ugni Blanc	3333 ceps/ha - 1.5m Feuillage sans irrigation, sans éclaircissage, sans mulch	Structure de Base	Contrôle			15.3	1.5	0.99	0.61		
				A2	13	-3	19.4	1.6	0.93	0.61		
				B2	18	-2	19.7	1.6	0.94	0.61		
		3333 ceps/ha - 1.5m Feuillage sans Irrigation, éclaircissage libre, sans mulch	Nouvelle Structure 1	A2	13	-3	16.6	1.6	0.93	0.67	-	Non
				B2	18	-2	17.2	1.6	0.94	0.65	-	Non
		5000ceps/ha - 1.3m Feuillage sans irrigation, éclaircissage libre, sans mulch	Nouvelle Structure 2	A2	13	-3	21.1	2.3	0.87	0.63	-	Non
	B2			19	-2	21.2	2.2	0.89	0.63	-	Non	
	Syrah	3333 ceps/ha - 1.5m Feuillage sans irrigation, sans éclaircissage, sans mulch	Structure de Base	Contrôle			12.7	1.7	0.99	0.59		
				A2	10	-3	13.9	2.0	0.92	0.64		
				B2	14	-2	14.3	2.0	0.93	0.62		
		3333 ceps/ha - 1.5m Feuillage sans irrigation, éclaircissage libre, sans mulch	Nouvelle Structure 1	A2	10	-4	11.7	2.0	0.92	0.69	-	Non
				B2	14	-2	12.4	2.0	0.93	0.66	-	Non
5000ceps/ha - 1.3m Feuillage sans irrigation, éclaircissage libre, sans mulch		Nouvelle Structure 2	A2	10	-4	15.0	2.8	0.86	0.64	-	Non	
	B2		14	-2	15.5	2.7	0.89	0.61	-	Non		

Ces résultats montrent donc que la structure actuelle (5000/1.3) du vignoble de Bordeaux s'avère la mieux adaptée aux impacts du changement climatique. Cependant, cette structure n'apporte pas d'amélioration importante et dans ce cas, il faudrait donc étudier d'autres choix techniques et structuraux pour essayer d'atténuer les impacts du changement climatique.

Enfin, les types de sols étudiés ne sont pas représentatifs de tous les types de sols présents dans le vignoble de Bordeaux. Ainsi, il serait intéressant d'élargir l'étude dans les sols de graves à faible réserve en eau, et qui pourraient agir de façon complètement différente. Dans ce cas, il est possible que l'on observe des variations plus importantes entre les différentes structures étudiées.

Le Tableau 41 montre les valeurs attendues pour chacune des variables contrôlées, en prenant en compte les différentes modifications énoncées ci-dessus.

5.2.4. Région de Cognac

L'analyse des impacts dans la région de Cognac, montre que le système actuel pourrait être maintenu, mais il est aussi possible d'augmenter la densité de plantation sans avoir d'impact négatif sur les différents critères étudiés. Ainsi, l'analyse en fonction de la qualité montre la possibilité d'utiliser les structures 3333 ceps/ha avec 1.5m de hauteur du feuillage (3333/1.5) et la structure 5000 ceps/ha avec 1.3m (5000/1.3) dans toutes ses combinaisons possibles.

Par rapport aux rendements, la structure (3333/1.5) permettrait d'augmenter légèrement le niveau de production actuelle (même avec éclaircissage), tandis que la structure (5000/1.3) permettrait de l'augmenter nettement (avec ou sans éclaircissage). Les deux structures retenues présentent une légère augmentation des niveaux de stress hydriques (légèrement accentués dans le scénario A2). Néanmoins, les niveaux de stress restent très modérés. La structure (3333/1.5) montre une diminution du stress azoté (moins visible dans la structure (5000/1.3)), qui est surtout due à une augmentation de la minéralisation de l'azote dans le sol et de sa disponibilité pour la plante.

L'analyse montre que ni l'irrigation, ni l'introduction d'un mulch n'apportent de modifications significatives sur la qualité et la production.

Une des principales modifications à prendre en compte pour le vignoble de Cognac est la possibilité d'introduire de nouveaux cépages, comme par exemple la Syrah. Dans ce cas, la dégradation des conditions de maturation observée pour le cépage Ugni Blanc, n'est pas représentative pour le cépage Syrah. Ainsi, le réchauffement attendu pour cette région pourrait tout à fait convenir à la maturation de ce cépage (recherche de la quantité de sucre), contrairement au cépage Ugni blanc, pour lequel la recherche est orientée vers un niveau d'acidité plus élevé qui pourrait être fortement pénalisé par les fortes chaleurs (même si l'on n'observe pas de problèmes de sur-maturité). Cependant, notre analyse ne permet pas de déterminer le type de qualité que l'on peut obtenir à la récolte. Le Tableau 42 montre les valeurs attendues pour chacune des variables contrôlées, en prenant en compte les différentes modifications énoncées ci-dessus.

5.2.5. Région de Bourgogne

Dans la région de Bourgogne l'analyse des différentes combinaisons a montré des résultats très intéressants. Ainsi, même si dans le choix final le système actuel pourrait être maintenu (9090/ha et 0.9 m), il est important de remarquer quelques considérations par rapport aux autres structures testées.

Tableau 43. Valeurs des différents variables, selon les nouvelles structures retenues et en comparaison avec les valeurs de base pour la région de Bourgogne.

		Nouvelle Structure	Structures comparés	Scénarios	F_IQ _{CLIMAT}	IQ _{CLIMAT}	Rendement (t/ha)	LAI (m ² /m ²)	Stress Hydrique	Stress Azoté	Irrigation (mm)	Sur-maturité
Bourgogne	Pinot Noir	9090ceps/ha - 0.9m Feuillage sans irrigation, éclaircissage libre, sans mulch	Structure de Base	Contrôle			10.8	1.9	0.73	0.67		
				A2	15	-4	14.6	3.1	0.61	0.65		
				B2	18	-1	15.3	2.7	0.69	0.67		
		3333ceps/ha - 1.5m Feuillage Sans Irrigation, éclaircissage libre, sans mulch	Nouvelle Structure1	A2	15	-3.8	10.2	1.6	0.67	0.69	-	oui
				B2	19	-1	11.4	1.5	0.73	0.69	-	non
		5000ceps/ha - 1.3m Feuillage Sans Irrigation, éclaircissage libre, sans mulch	Nouvelle Structure2	A2	15	-3.9	12.3	2.2	0.64	0.67	-	oui
				B2	19	-1	13.2	2	0.71	0.67	-	non
		9090ceps/ha - 0.9m Feuillage Avec Irrigation A2, éclaircissage libre, sans mulch	Nouvelle Structure3	A2	15	-3.7	16.6	3.4	0.71	0.63	55	oui
				B2	19	-1	15.3	2.7	0.69	0.67	-	non
	Syrah	9090ceps/ha – 0.9m Feuillage sans irrigation, éclaircissage libre, sans mulch	Structure de Base	Contrôle			6.2	2.6	0.71	0.67		
				A2	15	-4	8.9	4.1	0.58	0.65		
				B2	18	-1	9.6	3.6	0.65	0.66		
		3333ceps/ha – 1.5m Feuillage Sans Irrigation, éclaircissage libre, sans mulch	Nouvelle Structure1	A2	16	-3.8	6.5	2.1	0.63	0.74	-	non
				B2	19	-1	7.5	2.1	0.7	0.71	-	non
		5000ceps/ha - 1.3m Feuillage Sans Irrigation, éclaircissage libre, sans mulch	Nouvelle Structure2	A2	16	-3.9	8.4	2.9	0.6	0.67	-	non
				B2	19	-1	8.9	2.8	0.67	0.66	-	non
		9090ceps/ha - 0.9m Feuillage. Avec Irrigation A2, éclaircissage libre, sans mulch	Nouvelle Structure3	A2	16	-3.7	10.7	4.5	0.7	0.63	57	non
				B2	19	-1	9.6	3.6	0.65	0.66	-	non

Tableau 44-a. Valeurs des différents variables, selon les nouvelles structures retenues et en comparaison avec les valeurs de base pour la région d'Anjou pour le cépage Cabernet Franc.

		Sol	Nouvelle Structure	Structures comparés	Scénarios	F_IQ _{CLIMAT}	IQ _{CLIMAT}	Rendement (t/ha)	LAI (m ² /m ²)	Stress Hydrique	Stress Azoté	Irrigation (mm)	Sur-maturité
Anjou	Cabernet Franc	fRU	5000 ceps/ha - 1.3m Feuillage sans irrigation, sans éclaircissage, sans mulch	Structure de Base	Contrôle			6.6	0.9	0.45	0.66		
					A2	8	-5	7.2	1.0	0.31	0.62		
					B2	9	-3	7.2	0.9	0.33	0.64		
			3333 ceps/ha - 1.5m Feuillage avec irrigation, éclaircissage libre, sans mulch	Nouvelle Structure1	A2	9	-5	10	1.3	0.62	0.66	97	Non
					B2	13	-2.5	10.3	1.3	0.63	0.65	97	Non
					5000 ceps/ha - 1.3m Feuillage avec irrigation, éclaircissage libre, sans mulch	Nouvelle Structure2	A2	9	-5	12.3	1.8	0.6	0.64
	B2	13	-2.5	12.2			1.7	0.61	0.64	112	Non		
	gRU	5000 ceps/ha - 1.3m Feuillage sans irrigation, sans éclaircissage, sans mulch	Structure de Base	Contrôle			16.8	2.4	0.78	0.85			
				A2	9	-5	20.2	2.9	0.70	0.86			
				B2	13	-3	19.8	2.7	0.69	0.87			
		3333 ceps/ha - 1.5m Feuillage sans irrigation, éclaircissage libre, sans mulch	Nouvelle Structure1	A2	10	-5	14.6	2.1	0.77	0.86	-	Non	
				B2	13	-2.5	15.2	2.1	0.76	0.87	-	Non	
5000 ceps/ha - 1.3m Feuillage sans irrigation, éclaircissage libre, sans mulch				Nouvelle Structure2	A2	10	-5	17.1	2.9	0.70	0.86	-	Non
	B2	13	-2.5		17.3	2.7	0.69	0.87	-	Non			

Tableau 44-b. Valeurs des différents variables, selon les nouvelles structures retenues et en comparaison avec les valeurs de base pour la région d'Anjou pour le cépage Syrah.

		Sol	Nouvelle Structure	Structures comparés	Scénarios	F_IQ _{CLIMAT}	IQ _{CLIMAT}	Rendement (t/ha)	LAI (m ² /m ²)	Stress Hydrique	Stress Azoté	Irrigation (mm)	Sur-maturité
Anjou	Syrah	fRU	5000 ceps/ha - 1.5m Feuillage sans irrigation, sans éclaircissage, sans mulch	Structure de Base	Contrôle			5.4	1.4	0.4	0.68		
					A2	7	-5	5.3	1.5	0.26	0.63		
					B2	9	-3	5.7	1.4	0.28	0.65		
			3333 ceps/ha - 1.5m Feuillage avec irrigation, éclaircissage libre, sans mulch	Nouvelle Structure1	A2	10	-5	7.8	1.8	0.61	0.68	107	Non
					B2	10	-2.6	8.6	1.8	0.62	0.67	106	Non
					5000 ceps/ha - 1.3m Feuillage avec irrigation, éclaircissage libre,sans mulch	Nouvelle Structure2	A2	10	-5	9.7	2.6	0.59	0.65
	B2	9	-2.6	10.2			2.5	0.6	0.64	122	Non		
	gRU	5000 ceps/ha - 1.5m Feuillage sans irrigation, sans éclaircissage, sans mulch	Structure de Base	Contrôle			12.7	3.5	0.74	0.88			
				A2	9	-5	12.7	3.7	0.65	0.89			
				B2	10	-3	13.6	3.6	0.64	0.90			
		3333 ceps/ha - 1.5m Feuillage sans irrigation, éclaircissage libre,sans mulch	Nouvelle Structure1	A2	10	-5	8.9	2.6	0.72	0.91	-	Non	
				B2	11	-2.6	9.7	2.6	0.72	0.91	-	Non	
5000 ceps/ha - 1.3m Feuillage sans irrigation, éclaircissage libre,sans mulch		Nouvelle Structure2	A2	10	-5	11	3.7	0.65	0.89	-	Non		
	B2		11	-2.6	12	3.6	0.64	0.90	-	Non			

Les premières analyses en fonction de la qualité ont montré la possibilité d'utiliser les structures 3333 ceps/ha avec 1.5m de hauteur du feuillage (3333/1.5) et la structure 5000 ceps/ha avec 1.3m (5000/1.3), en plus de l'actuelle (9090/0.9). Par contre, chacune des structures nécessite des techniques différentes aux autres, pour atteindre le même niveau de qualité. Ainsi, la structure (3333/1.5) ne montre pas le besoin d'utiliser l'irrigation ou l'éclaircissage pour améliorer les conditions de la maturation, contrairement aux structures (5000/1.3) et (9090/0.9) qui demandent l'introduction de l'irrigation, et dans le cas de la structure (9090/0.9), il paraît même nécessaire d'introduire l'éclaircissage.

En ce qui concerne les rendements, la structure (3333/1.5) permet de maintenir le niveau de production actuelle (avec ou sans éclaircissage), et les structures (5000/1.3) et (9090/0.9) l'augmentent sans problème (avec ou sans éclaircissage et sans irrigation). Pour ces deux dernières structures, l'augmentation du rendement est accentuée dans le scénario A2.

Comme nous l'avons dit, les structures (5000/1.3) et (9090/0.9) demandent l'introduction de l'irrigation pour améliorer les conditions de maturation. Dans le choix de la structure (9090/0.9), il est très important de mesurer l'impact économique de l'introduction de cet outil dans la qualité du produit final. La non introduction de l'irrigation dans le cas de la structure 4 génère une augmentation du stress hydrique par rapport au scénario Contrôle de +9% pour le scénario B2 et du +11% pour le scénario A2. Par contre, ces stress restent modérés (valeurs de l'indice SWFAC d'environ 0.6-0.7). La demande de la culture n'est pas très importante (60 mm pour le scénario A2 et 40 mm pour le scénario B2) et elle est très irrégulière selon les années (environ 36% de coefficient de variation), avec une période d'application pendant les mois de juillet et août. Dans les structures (3333/1.5) et (5000/1.3), l'introduction d'un système d'irrigation n'est pas conseillée, car les quantités demandées par la plante sont encore inférieures à celle de la structure (9090/0.9) et elles sont aussi variables (36% de coefficient de variation). Dans le Tableau 43, nous avons retenu seulement l'irrigation pour la structure (9090/0.9) dans le scénario A2.

L'introduction de la Syrah semble être possible (pas de problèmes importants au niveau du stress ou de la phénologie), même si, comme nous l'avons expliqué dans la partie 4.1.6. de ce chapitre, la date de récolte serait à la fin du mois de septembre, et qu'il nous est impossible de caractériser la qualité du produit final. Dans ce cas, aucun des deux cépages ne présente de problème de sur-maturité.

On peut conclure, que dans le cas du vignoble de Bourgogne, la diminution de la densité de plantation pourrait amener une légère amélioration des conditions de maturation, pour le rapprocher de notre valeur de base. En revanche, cette modification de la densité doit être étudiée pour quantifier l'impact réel sur la qualité finale du produit. De la même façon, l'introduction de l'irrigation est demandée dans la structure (9090/0.9), mais elle semble seulement indispensable dans le scénario A2, ce qui nécessite une très bonne gestion et rentabilité de l'introduction de cette irrigation.

Le Tableau 43 montre les valeurs attendues pour chacune des variables contrôlées, en prenant en compte les différentes modifications énoncées ci-dessus.

5.2.6. Région d'Anjou

Dans la région d'Anjou, l'analyse des différentes combinaisons a montré que le choix de stratégie dépend, de manière importante, du type de sol.

Le sol à gRU montre que les structures de plantation 3333 ceps/ha avec 1.5m de hauteur du feuillage (3333/1.5) et la structure 5000 ceps/ha avec 1.3m (5000/1.3) présentent des résultats semblables dans les analyses qualitatives, et ne varient pas beaucoup des valeurs de référence. La structure (3333/1.5) permet de maintenir les mêmes valeurs de rendements, par rapport aux valeurs retenues actuellement, tandis que la structure (5000/1.3) permet de les augmenter (+3.5t/ha pour le scénario A2 et +3t/ha pour le scénario B2). L'introduction dans ces parcelles de l'irrigation ne présente pas d'intérêt d'un point de vu qualitatif. La structure (5000/1.3) présente une augmentation d'environ +9% du niveau du stress hydrique (pour les deux scénarios), qui n'est pas observable avec l'utilisation de la structure (3333/1.5). Par contre, les valeurs de stress hydrique restent très modérées (valeurs de SWFAC autour du 0.65-0.8). L'utilisation de l'éclaircissage et du mulch, ne présente pas d'avantage supplémentaire pour l'amélioration des conditions de la culture. Dans ce type de parcelles, l'amélioration des conditions microclimatiques reste faible et il faudrait envisager d'autres modifications que celles qui ont été prises en compte dans cette étude.

Dans les parcelles avec un sol à fRU, l'introduction de l'irrigation apparaît comme une condition indispensable pour l'amélioration de la qualité. Celle-ci peut modifier d'une manière très importante la valeur des critères qualitatifs. L'application de l'irrigation permet de retenir les mêmes structures de plantation que pour les sols à gRU : (3333/1.5) et (5000/1.3). Ainsi, avec l'irrigation, elles montrent des résultats semblables dans les analyses qualitatives. L'irrigation montre aussi un impact très important sur l'augmentation des rendements (ils sont presque doublés dans le cas de la structure (5000/1.3)). En contrepartie, l'introduction de l'irrigation ne permet pas d'observer de différence entre les niveaux de stress hydrique et azoté. De la même façon que pour les sols a gRU, l'utilisation de l'éclaircissage et du mulch, ne présente pas d'avantage supplémentaire pour l'amélioration des conditions de la culture. La demande en eau pour l'irrigation reste la même dans les deux scénarios (plus importante dans la structure (5000/1.3)). La période d'irrigation déterminée par le modèle est très longue : elle pourrait commencer à partir de la fin juin et finir au début septembre.

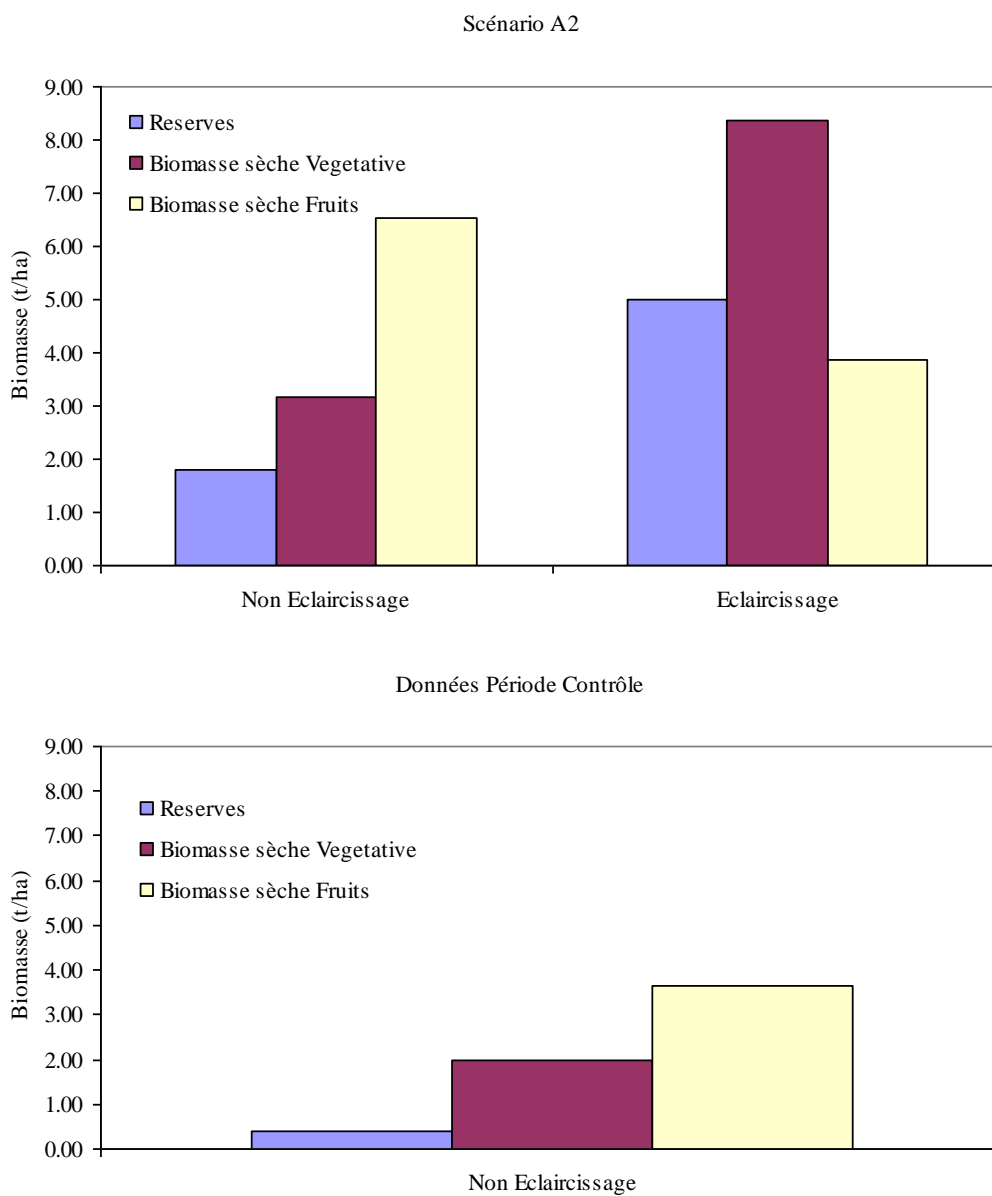
En ce qui concerne l'adaptation des cépages, elle diffère selon le type de sol. Ainsi, dans le sol à gRU, la Syrah présente des niveaux de stress hydrique plus importants que le Cabernet franc, mais ils sont encore très modérés. Cette tendance est confirmée dans le sol à fRU, car la Syrah présente une demande d'irrigation légèrement plus élevée que le Cabernet Franc. Dans ce cas, cette demande pourrait être justifiée par les différences au niveau du cycle phénologique, qui font que la Syrah met en place plus rapidement son feuillage (valeurs de LAI toujours plus élevées pour le cépage Syrah à tous les stades), ce qui va augmenter sa transpiration par la suite. Enfin, nous n'avons pas observé de sur-maturité pour les deux cépages dans aucune des conditions testées.

Le Tableau 44 (a et b) montre les valeurs attendues pour chacune des variables contrôlées, en prenant en compte les différents modifications énoncés ci-dessus.

5.2.7. Région de Champagne

Dans le cas de la région de Champagne, les impacts climatiques n'étaient pas trop importants. En terme de production, ils étaient plutôt d'ordre positif et les conditions de la maturité étaient plutôt faibles (valeurs de IQ_{CLIMAT} égales à -1 pour le scénario B2 et -3 pour le scénario A2). Notre analyse a

Figure 48. Variations des différentes composantes de la biomasse en fonction de si l'on réalise ou pas un éclaircissage.



permis de montrer quelques éléments qui pourraient permettre d'optimiser encore plus la situation du vignoble champenois.

D'une manière générale, dans l'analyse de la qualité, les structures de plantation 3333 cep/ha avec 1.5m de hauteur du feuillage (3333/1.5), la structure 5000 cep/ha avec 1.3m (5000/1.3) et 9090cep/ha avec 0.9m de hauteur du feuillage (9090/0.9), ne présentent pas de différences très importantes entre elles. Cette constatation est la même pour les deux cépages et les deux scénarios étudiés.

Les parcelles qui montrent les plus forts rendements sont celles qui se trouvent dans la structure (9090/0.9), sans éclaircissage et avec l'utilisation d'un mulch. Le choix de réaliser un éclaircissage s'avère indispensable pour gérer les stress de la plante. La réalisation d'un éclaircissage montre une augmentation de la quantité des réserves stockées dans la plante, ainsi qu'une croissance de l'appareil végétatif très importante, qui va se traduire par une plus forte demande hydrique (augmentation du LAI) (

Figure 48) et une plus forte concurrence des feuilles sur les fruits. Cependant, il faut rappeler que dans notre cas, nous n'avons pas introduit de rognage, ce qui pourrait servir à contrôler cette croissance végétative. Il faudrait tester des combinaisons de rognages et de charge en fruits pour essayer de déterminer le meilleur équilibre (dans les cas avec éclaircissage, la production de biomasse végétative est largement plus importante que celle des fruits, et sans éclaircissage la tendance est inversée).

Les structures (3333/1.5) et (5000/1.3) permettent aussi de maintenir les mêmes niveaux de production qu'actuellement (environ 20t de rendement frais/ha), sans par contre augmenter la partie végétative. Dans ce cas, on observe aussi un effet positif de l'absence d'éclaircissage et de l'utilisation d'un mulch. Seulement dans le cas du Syrah, l'utilisation de l'éclaircissage paraît améliorer les conditions de la maturation.

Contrairement aux autres régions, l'utilisation d'un mulch combinée avec le fait de non éclaircir s'avère importante pour diminuer le niveau de stress hydrique dans toutes les structures testées. Par contre le stress azoté augmente légèrement, mais il reste modéré. L'irrigation ne semble pas nécessaire pour améliorer les conditions de maturation ou les rendements.

Les deux cépages montrent les mêmes tendances, même si pour le cépage Syrah, la production est plus faible que pour le cépage Chardonnay. Le cépage Syrah montre une tendance à accentuer les stress (comme dans les autres régions). Dans aucun cas, ces deux cépages ne présentent des situations de sur-maturité. Comme nous l'avons expliqué dans le chapitre IV.4.1.1, il pourrait être envisagé d'introduire la culture du cépage Syrah dans ce vignoble, mais il est possible qu'il n'arrive pas aux niveaux de production de teneurs en sucre des régions d'origine. D'autre part, la modification des conditions pourrait permettre de vendanger plus tardivement les cépages typiques de la région (Chardonnay, Pinot Noir et Pinot Meunier), ainsi que d'introduire de nouveaux cépages originaires de régions plus tempérées, et de produire d'autres types de vins que les vins mousseux de Champagne.

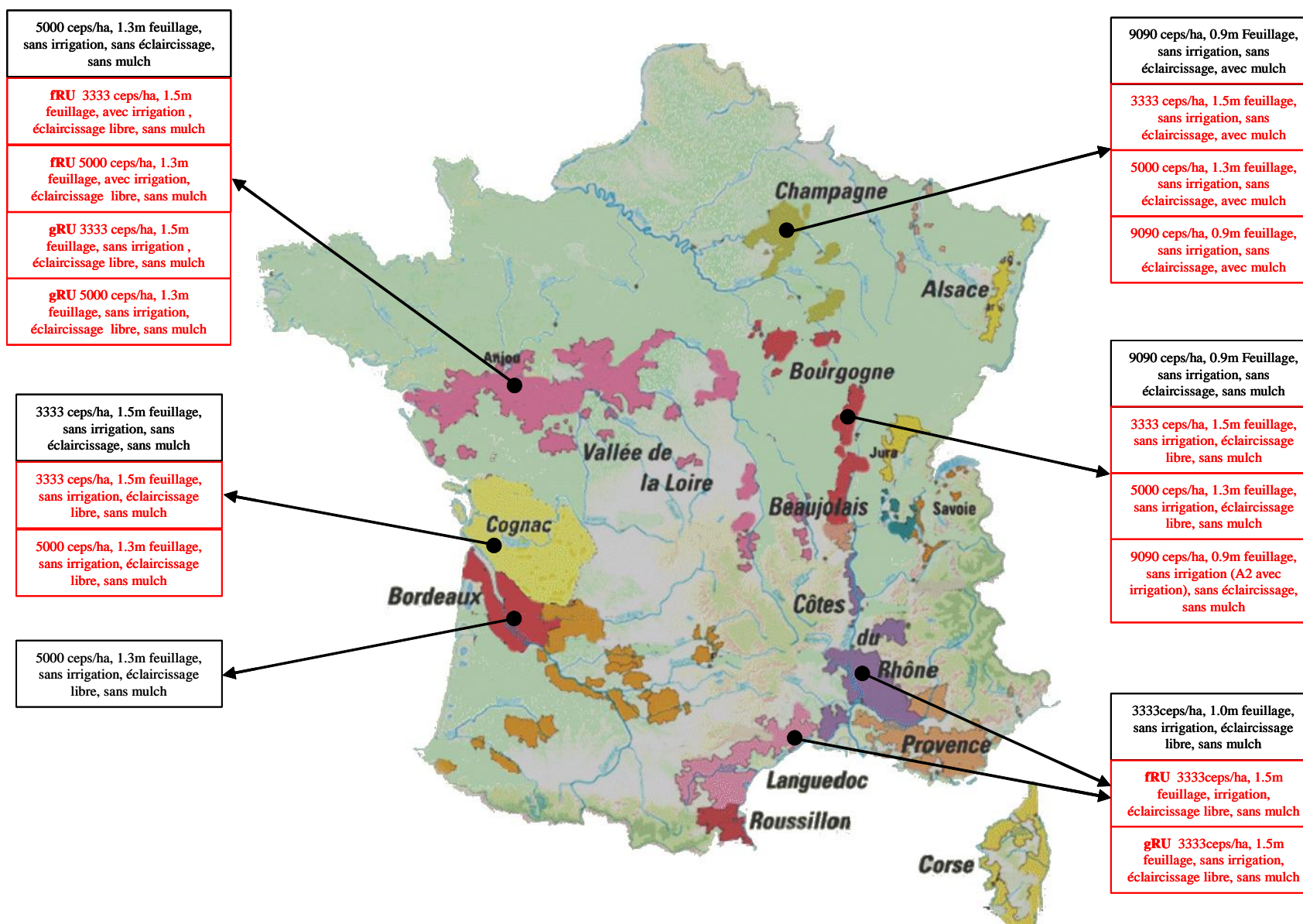
Le Tableau 45 montre les valeurs attendues pour chacune des variables contrôlées, en prenant en compte les différentes modifications énoncées ci-dessus.

La Figure 49 montre sur une carte de France, les différentes structures proposées dans chacun des vignobles de l'étude. Ceci nous permet d'avoir une vision d'ensemble pour constater les différentes stratégies à suivre.

Tableau 45. Valeurs des différents variables, selon les nouvelles structures retenues et en comparaison avec les valeurs de base pour la région de Champagne.

		Nouvelle Structure	Structures comparés	Scénarios	F_IQ _{CLIMAT}	IQ _{CLIMAT}	Rendement	LAI	Stress Hydrique	Stress Azoté	Irrigation	Sur-maturité
Champagne	Chardonnay	9090ceps/ha - 0.9m Feuillage Sans Irrigation, sans éclaircissage, avec mulch	Structure de Base	Contrôle			18.6	1.9	0.98	0.75		
				A2	15	-3	32.7	1.6	0.92	0.68		non
				B2	9	-1	29.3	1.7	0.93	0.7		non
		3333ceps/ha - 1.5m Feuillage Sans Irrigation, sans éclaircissage, avec mulch	Nouvelle Structure 1	A2	15	-3	24.7	0.8	1	0.74	-	non
				B2	9	-1	22.1	0.8	1	0.77	-	non
		5000ceps/ha - 1.3m Feuillage Sans Irrigation, sans éclaircissage, avec mulch	Nouvelle Structure 2	A2	15	-2.8	29.6	1	0.99	0.71	-	non
	B2			9	-1	26.8	1	0.99	0.74	-	non	
	Syrah	9090ceps/ha - 0.9m Feuillage Sans Irrigation, sans éclaircissage, avec mulch	Nouvelle Structure 3	A2	15	-3	32.7	1.6	0.92	0.68	-	non
				B2	9	-1	29.3	1.7	0.93	0.7	-	non
				Contrôle			12.4	2.6	0.96	0.76		
		3333ceps/ha - 1.5m Feuillage Sans Irrigation, avec éclaircissage, avec mulch	Nouvelle Structure 1	A2	17	-3	22.2	2.8	0.81	0.67		non
				B2	11	-1	20	2.8	0.85	0.7		non
5000ceps/ha - 1.3m Feuillage Sans Irrigation, avec éclaircissage, avec mulch		Nouvelle Structure 2	A2	19	-2.1	20	1.6	0.94	0.71	-	non	
	B2		11	-0.8	18.3	1.5	0.97	0.75	-	non		
	A2		19	-2.2	22	2	0.88	0.69	-	non		
9090ceps/ha - 0.9m Feuillage Sans Irrigation, Sans éclaircissage, avec mulch	Nouvelle Structure 3	A2	17	-2.4	22.2	2.8	0.81	0.67	-	non		
		B2	11	-0.8	20	2.8	0.85	0.7	-	non		

Figure 49. Carte des différents vignobles de France avec les structures actuelles (en noir) et les structures proposées dans notre analyse d'impacts (en rouge).



6. Considérations générales et limites de notre étude d'impacts

Comme nous l'avons montré dans cette étude, dans certaines régions les modifications des conditions climatiques et leur impact sur le développement et la croissance de la vigne, et en particulier les conditions de maturation du raisin, sont trop importantes pour être atténués par des modifications de type structurale ou technique. Ainsi, nous proposons des stratégies supplémentaires à celles déjà montrées et des considérations à prendre en compte par la suite.

A partir des prévisions de modification des conditions hydriques à la fin du siècle, qui, comme nous l'avons montré, va générer une augmentation des stress hydriques en fin de cycle, nous proposons de réaliser des études approfondies sur l'efficacité d'utilisation d'eau par différents cépages (Schultz et Lebon, 2004; Medrano *et al.*, 2005). Cela pourrait se faire par différentes voies:

- ❖ une sélection des clones les plus résistants à la sécheresse des cépages acceptés dans les AOC, de manière à essayer de garder les cépages existants dans chaque région. Dans ce cadre le développement des collections de clones déjà existants présente un intérêt principal pour rechercher ce type de caractéristiques, surtout pour les cépages typiquement cultivés dans les régions du sud;
- ❖ la recherche de ce type de caractéristiques dans les cépages secondaires des différentes régions (cépages à faible intérêt économique actuel). Medrano *et al.*, (2005) montrent qu'il existe beaucoup des cépages autochtones qui présentent des capacités d'adaptation à des conditions limitées en eau, mais qu'ils sont très peu utilisés. Dans leur travail, ils montrent que les cépages le plus utilisés sont aussi ceux qui ont, dans la plupart des cas, les plus faibles efficacités d'utilisation de l'eau. Ce travail nécessite parallèlement une mise en valeur des caractéristiques oenologiques de ces cépages, pour qu'ils puissent avoir un intérêt à la production ;
- ❖ la création des nouveaux cépages par le biais de croisements des cépages déjà existants, avec des caractéristiques intéressantes pour l'adaptation à la sécheresse et aux fortes températures (cas du cépage Marselan (création INRA) qui présente une bonne résistance à la sécheresse) ;
- ❖ étude de l'utilisation des différentes combinaisons porte-greffe – cépage, de manière à optimiser les caractéristiques d'adaptation aux nouvelles conditions climatiques (meilleure exploration du sol, vigueur...).
- ❖ en ce qui concerne le modèle STICS, cela passe par une adaptation des paramètres du fonctionnement hydrique de la plante, en fonction du cépage et du porte-greffe, contrairement à la version actuelle dans laquelle la gestion est identique pour tous les cépages.

L'étude d'adaptabilité de la Syrah (cf.III.4.1.7) dans les différentes régions peut être discutée du fait qu'il n'est pas le cépage le plus tardif et qu'il était déjà présent dans les régions du sud de la France (Côtes du Rhône et Languedoc). Il serait donc intéressant d'étudier d'autres cépages tardifs (p.e. Mourvedre) et leur combinaison avec des porte-greffes tardifs, afin d'observer si l'arrivée tardive aux différents stades permet de dépasser les différentes périodes de fortes températures et de stress hydrique prévues dans le futur.

Une autre question qui paraît importante aujourd'hui dans le cadre des études d'impact est la capacité d'adaptation des plantes aux fortes modifications du climat, en particulier à l'augmentation de la

Figure 50. Relation empirique entre le nombre de jours que la température de culture dépasse les 37 °C et la température de culture minimale pour la période véraison-récolte.

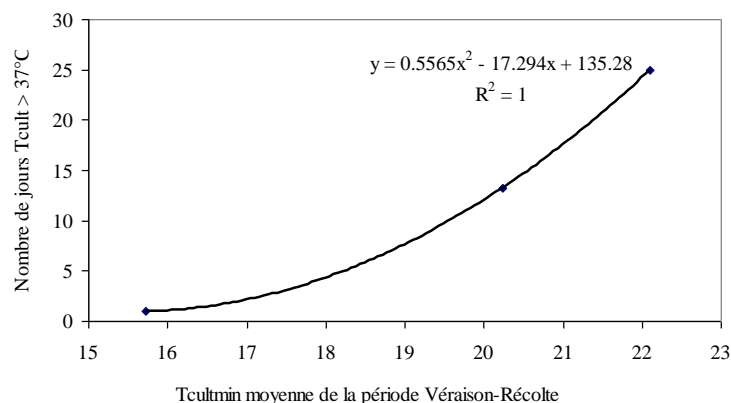


Figure 51. Carte d'altitudes (MTA) de la région de Languedoc et de Côtes du Rhône. Dans chaque image la zone en rouge se trouve dans la même altitude que notre point de référence utilisé pour l'étude d'impacts.

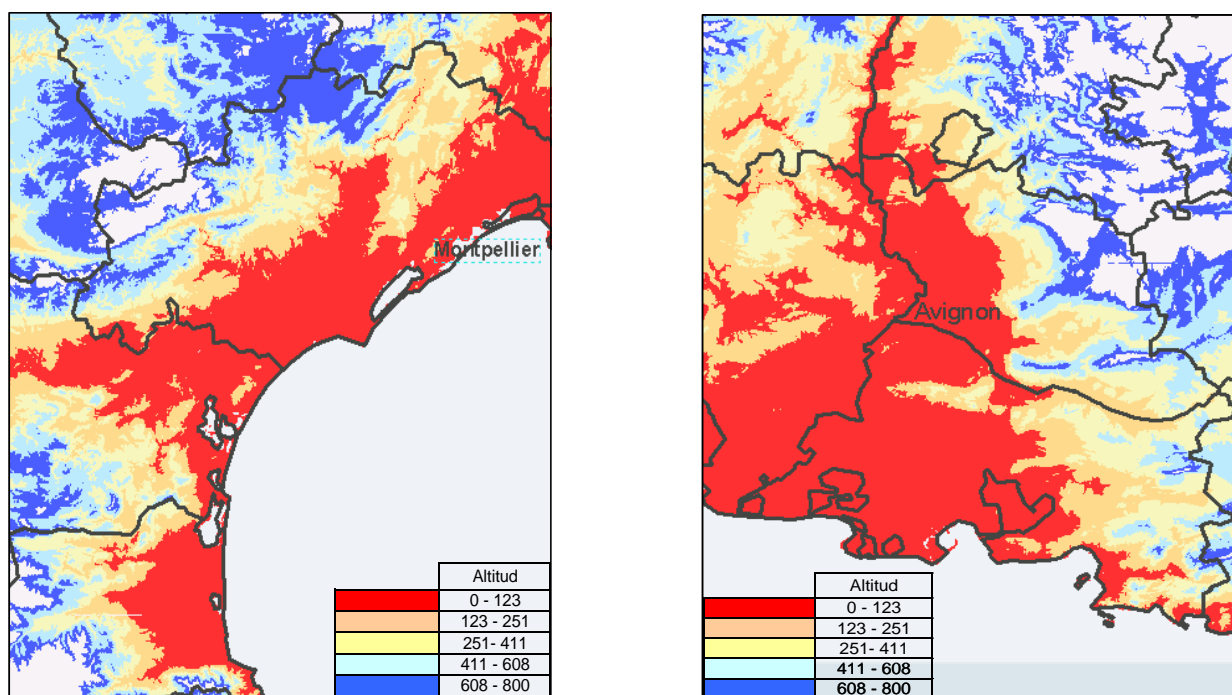


Tableau 46. Evolution probable de la température en fonction de l'altitude pour la région des Côtes du Rhône.

Altitude	B2			A2		
	Tmincult	Nbjours>37°C	IQ _{CLIMAT}	Tmincult	Nbjours>37°C	IQ _{CLIMAT}
0 - 123	20.2	13	-6	22.1	25	-11
123 - 251	18.8	7	-3	20.7	16	-7
251 - 411	17.9	4	-2	19.8	11	-5
411 - 608	16.9	2	-1	18.8	7	-3
608 - 800	15.8	1	0	17.7	4	-2

température. Dans notre travail nous avons fixé une série de températures cardinales qui gèrent le développement et la croissance de la vigne (25°C comme température optimale de croissance et 37°C comme température seuil de croissance, cf.II.4.1.). Il est possible que dans la réalité ces températures évoluent et que la plante montre une adaptabilité aux modifications climatiques. Il serait donc important d'envisager d'expérimentations sur la croissance et le fonctionnement de la vigne dans certaines régions dans lesquels l'on trouve aujourd'hui des surfaces viticoles exposés aux conditions attendues en France dans le futur (p.e. certaines zones des vignobles de Tunisie, Maroc). Les résultats obtenus dans ce type d'études pourraient nous permettre de mieux comprendre leur fonctionnement, et de par la suite prendre en compte ce type d'évolution dans les modèles de cultures.

Une autre stratégie pour diminuer les impacts négatifs du changement climatique est le déplacement des vignobles vers des zones en altitude dans la même région (Sort, 2006). Normalement, il existe une évolution des températures pour un effet d'altitude. Ainsi, pour une élévation de 100m on peut constater une diminution de 0.55 – 0.58°C pour les températures minimales et de 0.61-0.85°C pour les températures maximales (Antonioletti, 1986; Douguedroit, 1987). A partir de ces considérations et pour avoir un aperçu de l'évolution d'impacts avec l'altitude, nous proposons deux hypothèses:

- ❖ Les points qui se trouvent plus et moins à la même altitude que notre point de référence dans chaque région, pourraient présenter les mêmes impacts climatiques ;
- ❖ On pourrait estimer l'évolution de notre indice IQ_{CLIMAT} aux différents niveaux d'altitude grâce à une relation empirique (dépendante de la région) entre la température de culture minimale (calculée en fonction de l'évolution en fonction de l'altitude précédemment citée) et le nombre de jours où l'on dépasse les 37°C (Figure 50). Dans ce cas, on assume la température de culture égale à la température de l'air.

Cette approche très simplifiée (nous sommes conscients que nous ne prenons pas en compte la distance de la mer, l'exposition du soleil, la pente, l'occupation et le type de sol) permet néanmoins d'observer l'évolution de notre indice en fonction de l'altitude. La Figure 51 montre une cartographie des différents niveaux d'altitudes (MTA) pour la zone de Côtes du Rhône Méridionales et du Languedoc. Le Tableau 46 montre l'évolution probable de la température, du nombre de jours à plus de 37°C (température de culture) et l'évolution des valeurs de IQ_{CLIMAT} en fonction de l'évolution des températures par rapport à l'altitude de la région de Côtes du Rhône. Ainsi, la zone en rouge est située dans une gamme d'altitude dans laquelle notre point d'étude d'impacts de chaque région se trouve. Cela montre qu'une grande partie du vignoble des Côtes du Rhône et du Languedoc est concerné par les niveaux plus importants de notre indice IQ_{CLIMAT} . Ce type de résultat a déjà été montré par Sort (2006) sur le vignoble de Catalogne (Espagne), à partir d'une analyse de différents indices climatiques. Dans ce cas, la proposition était un déplacement des régions vers la montagne (les Pyrénées).

Dans plusieurs cas, l'irrigation est apparue comme un élément indispensable à l'amélioration des conditions de la maturation, et dans certains cas au maintien de la production (vignobles de Côtes du Rhône, Languedoc et Anjou). Le type de sol est le facteur clé pour l'application de l'irrigation. Par contre, dans tous les cas, il faudrait étudier la viabilité de cette irrigation, face à la disponibilité en eau qui dans le futur pourrait être fortement sollicitée (consommation humaine et concurrence avec d'autres activités agricoles). L'analyse des résultats des simulations nous a permis de constater que la vie de la plante n'est jamais mise en danger même dans les cas de fort stress et sans irrigation. Par contre, il ressort clairement que dans les sols à faible réserve utile, ou dans les régions dans lesquelles la pluviométrie de la période hivernale est limitée et ne permet pas de remplir la réserve d'eau disponible pour la plante,

l'irrigation devient fortement nécessaire si l'on veut continuer à produire du raisin dans des conditions les plus proches possibles de la situation actuelle.

Le type de sol s'est avéré être un élément très important pour gérer les impacts. Nous avons été limités par le temps et le volume des données à analyser ce qui nous a obligé à choisir une gamme très réduite des types de sol. Ainsi, il faudra prévoir d'élargir l'étude d'impacts sur une gamme de types de sols plus importante (surtout dans les régions de Bordeaux et de Bourgogne).

Plusieurs techniques pourraient être intégrées dans de futures études d'impacts sur la vigne avec le modèle STICS:

L'introduction du rognage pour la gestion de la végétation, afin de trouver de situations équilibrées entre la production de la biomasse végétative et celle des fruits (comme nous l'avons décrit pour la région de Champagne) ;

- ❖ La possibilité de tester différents niveaux de charge de grappes dans chaque région, pour étudier les impacts sur la concurrence feuille/fruit et les possibles limites de la plante à produire (par épuisement des réserves) ;
- ❖ L'introduction du travail ou non du sol dans les parcelles. De récentes études sur l'impact du changement climatique sur le tassement des sols montrent des résultats très intéressants sur l'évaporation de l'eau du sol, la minéralisation de l'azote, et les pertes par dénitrification sur des sols tassés (*N. Brisson, comm. pers.*);
- ❖ L'introduction de l'enherbement dans le système de culture. Ceci aura un impact direct sur le calcul des bilans hydriques et azotés du sol, ainsi que sur la croissance des cultures associées (vigne-fetouque, vigne-treffe...). Pour cela, il est intéressant d'utiliser la version du modèle STICS mise en place pour les cultures associées (*Celette et al., 2006*) ;
- ❖ L'utilisation des vignes en palissage large (type lyre). Il faudrait d'abord étudier la capacité du modèle STICS à décrire ce type de structures, ensuite mesurer l'amélioration des conditions du microclimat de la plante par un tel système et enfin étudier les possibles impacts sur le régime hydrique de la plante (plus forte demande en eau par une augmentation du feuillage).

Les résultats issus de notre étude montrent une nouvelle situation en terme d'évolution de la maturation du raisin (déséquilibre entre la croissance en biomasse des fruits et l'évolution de leur teneur en eau). La situation de "sur-maturité" dans laquelle pourraient se trouver certains vignobles dans le futur (même dans les conditions du scénario B2), doit nous interpeller pour mettre en place des expérimentations, afin de mieux comprendre ces mécanismes et de trouver des voies d'adaptation.

Parallèlement, l'indice climatique IQ_{CLIMAT} , créé afin de mesurer l'intensité du changement des conditions climatiques pendant la maturation, a montré son intérêt pour décrire les évolutions de la température de culture en fonction de différentes pratiques culturales appliquées à la parcelle.

D'autres domaines de recherche doivent être envisagés pour compléter nos études d'impacts: des recherches en œnologie pour pouvoir contrôler les (nouvelles) conditions organoleptiques du raisin; le développement des travaux d'impacts sur la modélisation des maladies de la vigne afin d'étudier leur apparition, leur développement et leur expansion (*Salinari et al., 2006*).

Enfin, il faut rappeler que les conditions de notre étude sont fortement conditionnées par les données climatiques simulées du modèle ARPEGE-Climat et par la méthodologie utilisée pour leur utilisation (méthode des anomalies appliquées directement).

Les études sur le réchauffement de la planète se poursuivent, et les modèles climatiques globaux continuent de se perfectionner, leur résolution devenant de plus en plus fine. Ainsi, ce type d'étude devra être réactualisée avec des données climatiques des futures nouvelles versions des modèles climatiques globaux.

Conclusion & Perspectives

Conclusion et Perspectives

Nous avons proposé dans ce travail un modèle de culture générique adapté à la vigne : le modèle STICS-vigne. Son adaptation a été réalisée à l'échelle de la France, ce qui a permis de tenir compte d'une large gamme de situations et donc de pouvoir, par la suite, l'utiliser dans une étude d'impacts du changement climatique dans différents vignobles français.

Pour adapter le modèle STICS à la vigne nous avons mis en place une méthodologie afin de mettre en adéquation le modèle avec les connaissances agrophysiologiques de la culture.

Dans un premier temps, l'analyse des différents formalismes du modèle a permis de définir son degré d'adaptation à cette culture et donc de déterminer le besoin d'intégrer ou de modifier des formalismes déjà existants dans le modèle pour améliorer la simulation du fonctionnement de la vigne.

Nous avons introduit un nouveau modèle pour le calcul de la date de débourrement: le modèle BRIN. Les principaux avantages de ce modèle sont de permettre le calcul de ce stade pour plusieurs cépages à l'échelle de la France, avec un seul jeu de paramètres par variété et de prendre en compte la période de dormance, ce qui le rend plus proche de la réalité physiologique de la plante. Les résultats obtenus sont assez satisfaisants, même si nous avons observé une forte sensibilité des résultats de simulation de ce stade aux conditions climatiques de la parcelle et donc à la distance de la station météorologique utilisée pour son calcul.

Nous avons aussi introduit le calcul du potentiel foliaire de base. L'introduction de la simulation de cette variable, typiquement mesurée dans les expérimentations viticoles, a permis d'inverser le modèle et d'ajuster les paramètres qui définissent le sol dans le modèle, dont certains n'étaient pas toujours faciles à mesurer sur le terrain (par exemple la profondeur d'enracinement). Nous avons montré que ce calcul est fortement dépendant de la simulation du LAI par le modèle, ce qui limite son utilisation comme variable de sortie.

Le calcul de la maturation du raisin par le modèle a été complètement révisé afin de tenir compte des différentes dynamiques (eau et carbone) et de son asynchronie. L'expérimentation mise en place pendant 3 ans, et l'utilisation de la technique de la densimétrie, nous a permis d'introduire une nouvelle description mathématique de la croissance en carbone des baies, conforme avec celle déjà décrite dans la bibliographie. Les résultats obtenus dans ce travail permettent de considérer son utilisation pour plusieurs cépages, même si son développement avait été réalisé à partir de variétés typiques du sud (Grenache et Syrah).

La gestion des réserves carbonées et azotées, ainsi que leur dimensionnement a fait partie des travaux réalisés pour l'adaptation du modèle à la vigne. Ceci nous a permis d'ajuster le modèle aux connaissances déjà acquises sur cette partie de la plante.

Nous avons également approfondi la réflexion sur les relations entre la structure du feuillage, l'intervention du viticulteur et l'interception du rayonnement. Nous avons ainsi considéré que le

modèle était capable de reproduire la plupart des conditions observées dans les vignobles de France, soit en terme de densité de plantation, soit en terme de type de taille utilisée (guyot simple ou double, cordon royat, chablis). Des modifications ont été introduites pour mieux tenir compte des techniques appliquées au feuillage.

La demande en azote de la plante a été redéfinie, afin de tenir compte de sa structure de plantation à faible densité (en comparaison avec les cultures annuelles) et des rapides variations de stress azoté qui ont été analysées dans de récentes recherches. Ainsi, à partir de données expérimentales, nous avons pu décrire une courbe de dilution de l'azote dans la plante (typiquement décrite pour les cultures annuelles), qui a été utilisée par la suite dans le modèle et qui a permis de gérer de manière satisfaisante la demande d'azote par la plante.

Enfin, nous avons introduit l'effet de la photopériode et de la vigueur de la plante sur la sénescence des feuilles. De cette façon nous avons remis en cause le caractère génétique de la sénescence des feuilles (défini dans STICS par une durée de vie) et nous avons pu ainsi simuler la période vendange-chute des feuilles, très importante pour la mise en place des réserves de la plante. Ce formalisme a été initialement développé pour étudier le fonctionnement de la plante durant cette période clé dans les conditions futures. Cependant, les résultats obtenus ne montrent pas beaucoup de sensibilité à l'état trophique de la plante, et sont surtout conditionnés par la photopériode. Par ailleurs, ce formalisme n'a pas pu être évalué par rapport à des mesures de terrain (manque d'observations du stade « chute de feuilles »), ce qui limite sa validité.

Dans un second temps, nous avons confronté les paramètres du modèle, caractérisant le fonctionnement de la plante aux connaissances acquises et aux mesures expérimentales réalisées sur la vigne. Ainsi, des paramètres biophysiques de STICS, qui avaient été définis au départ pour des cultures annuelles (blé, tomate), ont été décrits comparativement à des mesures écophysiological ou agronomiques réalisées expérimentalement sur une plante pérenne – ligneuse, la vigne. La valeur de chaque paramètre a été renseignée à partir de l'information présente dans la bibliographie existante, des mesures issues d'expérimentations spécifiques, et à partir de l'utilisation d'une méthode d'optimisation pour les paramètres difficilement mesurables dans la parcelle. La caractérisation de certains paramètres a été parfois complexe, en raison de la différence de significations entre le modèle et la mesure. Nous avons essayé d'être le plus précis possible dans leur description afin de permettre aux futures utilisateurs et modélisateurs de bien comprendre la signification de chacun. Ceci est très important pour mettre en place des expérimentations, afin de bien décrire les différentes mesures nécessaires à l'obtention de leur valeur. Ce travail est d'un grand intérêt pour les membres de la communauté scientifique qui travaillent sur le développement des modèles de cultures, et spécialement pour ceux qui se dédient aux plantes pérennes.

Dans un souci de robustesse du modèle, nous avons décidé de réaliser l'adaptation du modèle à l'échelle de la France. Ainsi, dans le cadre des études d'impacts du changement climatique, il nous a semblé plus cohérent d'adapter le modèle au plus grand nombre de situations pédoclimatiques, techniques et variétales possibles, ce qui nous a amenés à conduire des expérimentations dans 7 vignobles français (Côtes du Rhône, Languedoc, Bordeaux, Cognac, Bourgogne, Anjou et Champagne), sur 8 cépages (Grenache, Syrah, Pinot noir, Chardonnay, Merlot, Ugni blanc, Chenin et Cabernet Franc) et sur 2 années. De cette manière, nous tenons compte de cette variabilité dès le début

de son adaptation ce qui nous permet de ne pas extrapoler les résultats à partir d'un cas de référence. Ce choix nous semble pertinent, au regard de l'hétérogénéité des situations présentes dans les vignobles de France. De plus, ceci constitue l'originalité de notre travail, car la plupart des travaux d'adaptation de modèles de culture se réalise dans des conditions restreintes.

Pour pouvoir mettre en œuvre cette adaptation, nous avons mis en place d'importantes collaborations soit avec la communauté scientifique des « agronomes » de la vigne, ce qui a permis de comprendre le fonctionnement de cette plante, soit avec les structures interprofessionnelles et techniques, ce qui a permis de prendre également en compte les besoins spécifiques des professionnels, à l'égard de l'adaptation de l'outil. Nous avons ainsi essayé de répondre aux attentes des différentes communautés, de manière à tenir compte des préoccupations scientifiques d'une part et des besoins plus techniques de la profession d'autre part.

Grâce à ces collaborations, nous avons mis en place deux bases des données qui ont servi au paramétrage et à la validation du modèle : la Base de Données Ecophysiologiques (BDE) et la Base de Données Historiques (BDH). Elles ont été structurées en fonction des données nécessaires pour réaliser les simulations avec le modèle, ce qui leur confère un caractère générique et en permet facilement le transfert. En ce qui concerne la BDE, elle est constituée des données issues d'une expérimentation réalisée à l'échelle de la France (43 jeux de données). Elle a permis d'obtenir les valeurs des variables biophysiques nécessaires au calcul de certains paramètres : soit par mesures directes, soit par optimisation en fonction de ces variables mesurées. Pour l'obtention de ces mesures, nous avons décrit des protocoles adaptés à chaque région qui ont néanmoins permis de constituer un jeu de données homogène. Cette expérimentation a fourni de nombreuses informations sur la croissance et le développement de la vigne. Elle nous a permis entre autre de déterminer quelques valeurs qui décrivent la morphologie de la plante et qui pourraient être utilisées en combinaison avec des mesures allométriques déjà existantes (par exemple, les valeurs de teneurs en eau des différents organes). Néanmoins, dans certaines situations, la fréquence d'échantillonnage n'est pas apparue suffisante pour bien caractériser certaines variables dans certaines parcelles (notamment la mesure du LAI qui semble nécessiter un grand nombre de répétitions pour être significative).

La BDH, quant à elle, est constituée de données issues d'expérimentations anciennes de différents organismes collaborateurs. La constitution de cette base de données, très laborieuse, a cependant permis d'obtenir une importante quantité de renseignements qui ont été utilisés par la suite dans la validation (347 jeux de données).

La structure et le grand nombre de données recueillies font de ces deux bases de données un outil très complet pour de futures études, et notamment pour l'amélioration du modèle et de ses versions ultérieures.

La méthodologie d'optimisation s'avère performante. Les outils informatiques mis à disposition de l'utilisateur de STICS ont comme principal atout le fait de pouvoir réaliser des optimisations sur plusieurs variables et paramètres en même temps. En revanche, dans le cas de la vigne, et pour d'autres cultures indéterminées, il s'avère indispensable de contrôler que la concurrence entre les feuilles et les fruits ne génère pas de compensation des paramètres.

L'évaluation de l'ajustement des paramètres et la validation du modèle ont montré que cet outil pouvait être utilisé de façon pertinente pour l'aide à l'expérimentation ou pour des études d'impact.

Néanmoins, nous avons remarqué que son adaptation à l'échelle de la France avait par conséquence une de précision à l'échelle des différentes régions.

L'étude d'impacts du changement climatique réalisée avec le modèle a permis d'effectuer des prévisions pour chacune des régions, en prenant en compte les interactions du système sol-climat-cépage-pratiques techniques. Ainsi, cette étude présente plusieurs originalités par rapport à celles déjà existantes.

L'utilisation de STICS a permis de prendre en compte le bilan hydrique, et donc de pouvoir étudier sa modification et ses répercussions sur la production et la qualité. A notre connaissance, cet élément n'avait jamais été pris en compte dans les études d'impacts sur la vigne.

La possibilité de pouvoir tenir compte des différentes caractéristiques techniques et des cépages de chaque vignoble, a permis de décrire leur structure de la façon la plus réaliste possible. De cette façon chaque étude a été adaptée à chacune des régions et nous n'avons pas été pas obligés d'appliquer une même structure partout, ce qui aurait généré des problèmes d'interprétation des résultats. De plus, ceci a aussi permis d'étudier des stratégies d'adaptation de chaque vignoble au changement climatique afin d'améliorer leurs conditions de production et de maturation.

Les principaux résultats de notre étude sont un avancement des différents stades phénologiques et de la vendange, accompagné d'un raccourcissement du cycle de croissance - une augmentation de la biomasse végétative avec plus ou moins d'intensité en fonctions de régions - des tendances différentes en ce qui concerne la biomasse des fruits avec une augmentation dans les régions de Cognac, en Champagne et en Bourgogne, une stabilisation à Bordeaux et en Anjou, et une diminution dans les vignobles de Côtes du Rhône et Languedoc - une augmentation des stress hydriques en fin du cycle - et une forte modification des conditions climatiques pendant la maturation.

Pour résumer les conditions de la maturation, nous avons créé un indice IQ_{CLIMAT} , qui a permis de synthétiser la variation des conditions climatiques de la maturation par rapport à celles d'une année considérée très bonne, dans notre cas l'année 2005. Pour cela nous avons utilisé les informations concernant la température minimale moyenne de culture et le nombre de jours supérieurs à 37°C (température qui engendre des problèmes de remplissage des baies) pendant la période véraison-vendange. Le fait d'utiliser les stades phénologiques simulés et la température de culture calculée par le modèle, permet, contrairement aux autres critères climatiques viticoles, de prendre en compte d'une part le vrai état du développement de la plante (au lieu d'utiliser des périodes de temps fixes) et d'autre part l'état hydrique de la plante (information qui ne peut pas être obtenue avec la température de l'air). La valeur de cet indice nous a permis de mesurer l'impact des modifications climatiques de la maturation. Sa comparaison avec celle de l'année 2003 a permis de prendre conscience de l'importance des modifications futures. D'autre part, cet indice nous a servi dans la sélection des combinaisons techniques qui ont permis de diminuer les impacts du changement climatique. Néanmoins son utilisation reste limité à cette étude et donc ne permet pas de comparaison avec d'autres travaux réalisés auparavant pour caractériser le climat. Enfin, il serait nécessaire de confirmer la pertinence du rapport alloué à chacune de ses composantes (0.3 pour la température et 0.7 pour le nombre de jours).

En ce qui concerne les stratégies d'adaptation proposées par le modèle pour les différentes régions, il est intéressant de constater que l'irrigation apparaît comme un élément clé dans le maintien des

vignobles du sud. Ceci relance le débat sur la possibilité d'introduire cette technique dans les exploitations viticoles, car elle est aujourd'hui interdite.

Ce travail présente des limites que nous allons maintenant essayer de reprendre.

Ainsi, quelques spécificités physiologiques et techniques de la vigne, n'ont pas été prises en compte dans le modèle. C'est notamment le cas de la gestion de la taille et donc du nombre de grappes. Dans ce travail, ce problème a été surmonté par la génération de différents fichiers correspondants à la plante dans lesquels nous avons introduit des caractéristiques spécifiques à la taille. En revanche, cette méthode montre rapidement ses limites et semble peu appropriée pour réaliser une bonne gestion de la culture. Un autre élément qui n'a pas été pris en compte est la modélisation de l'induction florale, afin de simuler le plus correctement possible les différentes composantes du rendement.

Le fait de ne pas avoir pris en compte la biomasse des réserves dans notre paramétrage a pénalisé la simulation de la biomasse de rameaux, ce qui a empêché l'utilisation de la variable poids de bois de taille comme indicateur de la vigueur. Néanmoins, le modèle permet de caractériser la vigueur des différentes parcelles à partir d'autres variables comme le LAI ou les réserves stockées.

En ce qui concerne le paramétrage, il serait bon de revoir certains choix réalisés pendant cette étude. Ainsi, certains paramètres qui ont été définis comme dépendants de l'espèce, pourraient être redéfinis comme dépendants de la variété ou même dans certains cas du porte-greffe. C'est le cas, par exemple des paramètres qui définissent le fonctionnement hydrique de la plante. D'autre part, il est possible d'adapter plus précisément le modèle aux caractéristiques particulières de chaque région. Comme nous l'avons dit ci-dessus, dans notre souci de robustesse, nous avons préféré initialement adapter le modèle à l'échelle de la France, au lieu de faire une extrapolation du modèle adapté à une seule région. La conséquence de cette méthodologie est le manque de précision de la valeur des paramètres. Cependant, un paramétrage adapté à chaque région permettrait d'améliorer certains résultats de nos simulations.

Le modèle présente également des limites d'utilisation : il ne simule pas les processus d'élaboration de la qualité (à part la teneur en sucre de manière simplifiée), et il ne tient pas compte des stress biotiques. Il est donc primordial de connaître l'état phytosanitaire des parcelles expérimentales sachant que dans certains cas la présence de maladies permet d'expliquer les différences observées entre le terrain et la simulation. Cette information est particulièrement importante, dans le cas de la vigne, en raison de la forte pression biotique à laquelle elle est soumise.

L'étude n'a pas intégré certains vignobles français (cas des vignobles du Sud-ouest, et d'Alsace), en raison d'y l'impossibilité de mettre en place des expérimentations pour le paramétrage du modèle. Cependant, la large gamme de situations climatiques et techniques testées dans notre étude devrait garantir une adaptation relativement facile du modèle à des nouvelles régions.

La méthodologie utilisée pour le couplage des données climatiques du modèle ARPEGE-Climat présente également ses limites. L'application des anomalies calculées à partir des séries simulées par ARPEGE-Climat, directement sur des données réelles, ne permet pas de tenir compte des modifications de distribution des pluies durant chaque saison. A partir de cette méthode nous considérons que la distribution actuelle des pluies sera la même dans le futur, élément qui porte une forte incertitude. Si l'on tient compte des prévisions futures, les événements de forte pluviométrie (par

exemple les épisodes cévenols) devraient s'intensifier, ce qui dans notre cas n'as pas pu être pris en compte et qui aurait pourtant pu avoir un impact sur le bilan hydrique de la parcelle.

Ce travail ouvre de nouvelles perspectives de recherche à différents niveaux.

Comme nous l'avons indiqué ci-dessus, le modèle ne modélise pas les différentes composantes de la qualité. Par contre il permet de simuler un nombre important des variables biophysiques qui décrivent la croissance, le développement, la structure de la plante et les différents stress (hydrique, azoté et trophique). Ces indicateurs de l'état de la plante, pas toujours faciles à mesurer sur le terrain, pourraient être mis en relation avec les différentes composantes de la qualité, à partir de relations statistiques (régressions multiples, ACP). Les données décrivant la qualité ont été stockés dans la BDE et la BDH (teneur en sucre, acidité totale, anthocyanes, azote assimilable, azote totale, acide tartrique et malique, pH), et pourraient donc être utilisées pour réaliser une première étude. Un travail a déjà été initié dans l'Unité Expérimentale de l'INRA d'Angers sur un jeu très complet de données de qualité de différentes expérimentations de la région (Coulon, 2006). Ce type d'approche pourrait être valorisé pour la caractérisation de terroirs de différents vignobles de France.

Afin d'améliorer le calcul du rendement il serait important d'intégrer dans le modèle un formalisme qui permette de tenir compte du type de taille utilisé, de la charge en bourgeons laissée à la taille, et du calcul de l'induction florale. Ainsi, le modèle serait capable de calculer le nombre de grappes par cep sans devoir passer par des ajustements dans la plante.

Coupler le modèle STICS-vigne avec des modèles d'architecture de la végétation permettrait de décrire les structures du feuillage et les types de taille existantes dans les vignobles en prenant en compte les différents stress de la plante, ainsi que la compétition feuille/fruit (par exemple avec le modèle développé par Louarn, 2005 et Lebon *et al.*, 2005).

Il serait également intéressant de coupler STICS avec des modèles de maladies de la vigne. Un programme de recherche est déjà mis en place pour le développement générique de cette modélisation afin de mieux appréhender la réalité de la parcelle, dans des conditions de plus en plus répandues d'agriculture à bas niveau d'intrant (réduction de l'emploi de produits pesticides).

Le modèle pourrait être adapté à de nouveaux cépages. Un tel travail vient de débiter dans la région d'Alsace sur le Gewurztraminer et le Riesling. Le Cabernet Sauvignon pourrait également être adapté, sachant qu'il existe des données dans la BDH. Enfin, l'adaptation du modèle pourrait être étendue à de nouvelles variétés non présentes en France, comme le Tempranillo d'Espagne.

Le développement d'un nouveau générateur climatique qui tient compte des différentes variables nécessaires pour réaliser une simulation avec le modèle STICS, est en projet. La réalisation des nouvelles études d'impact avec cet outil nous permettra de prendre en compte non seulement les anomalies mais aussi leur distribution. De cette façon, nous pourrions prendre en compte les modifications des distributions intra-saisonnières prévues pour la fin du siècle.

Enfin, plusieurs voies d'utilisation du modèle sont ouvertes :

Une utilisation de STICS comme outil d'aide à l'expérimentation viticole: les expérimentations en viticulture étant très lourdes à mettre en place (temps, main d'œuvre), cet outil permettrait de réduire

le nombre de situations nécessaires dans certaines expérimentations. D'autre part cela permettrait aussi de confirmer, à l'échelle de la parcelle, certains résultats obtenus dans des conditions très contrôlées (plantes en pots, plantes en serre).

STICS-vigne peut également être employé dans des études de faisabilité pour l'agriculture de précision appliquée à la viticulture. Le modèle a déjà montré son utilité dans ce type d'études pour d'autres cultures. Il pourrait permettre de simuler à l'intérieur d'une parcelle l'hétérogénéité de l'alimentation en eau, en azote, et les conséquences sur la croissance et le développement de la plante.

De récents travaux ont montré l'intérêt de la télédétection pour mesurer certaines variables importantes pour la description des parcelles (par exemple la surface foliaire). Ce type de variables pourrait être utilisé pour inverser le modèle STICS et ainsi obtenir des informations pour décrire par exemple, certaines caractéristiques du sol (son état hydrique, sa profondeur...).

La capacité du modèle à intégrer de nouvelles techniques culturales, montre son utilité pour tester l'impact de certaines modifications, ainsi que pour en tester de nouvelles, afin d'aider à mieux définir les protocoles et les structures d'expérimentation.

Enfin, il pourrait être utilisé dans des études de caractérisation des paysages. Le modèle permet la simulation de 27 cultures avec la vigne, ce qui fait de lui un outil très intéressant pour la description du paysage à l'échelle de bassins versants par exemple.

Enfin, cette version du modèle STICS a déjà été intégrée dans un outil de prévision développé à l'Unité de Service Agroclim : la Veille AgroClimatique. Celui-ci permet de réaliser des prévisions à court terme de l'état des différentes cultures en fonction de données climatiques simulées, ce qui peut être très utile pour les différents membres de la profession.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Acutis M., Donatelli M., 2003. SOILPAR 2.00: software to estimate soil hydrological parameters and functions. *European Journal of Agronomy*. 18:373-377.
- Agenis-Nevers M., 2006. Impacts du changement climatique sur les activités viti-vinicoles. *Note techq.* N°3 20pp. [www.environnement.gouv.fr/IMG/pdf/note_technique_no3_version_Internet.pdf].
- Agut C., Rodriguez-Lovelle B., Fabre B., 2005. Effect of roostock on syrah behaviour. *Proceedings of 4th Gesco. Vol II. Geisenheim (Allemagne)*. 148-154pp.
- Alleweldt G., 1957. Der Einfluß der Photoperiode und Temperatur auf Wachstum und Entwicklung von Holzpflanzen unter besonderer Berücksichtigung der Gattung *Vitis* (Sammelreferat). *Vitis*. 1:159-180, citée par Fournioux J.C., 1997. Influences foliaires sur le développement végétatif de la vigne. *J. Int. Sci. Vigne Vin*. 31(4):165-183.
- Alleweldt G., 1959. Aufnahme und Weiterleitung des photoperiodischen Reizes bei *Vitis vinifera* L. *Naturwiss.* 46(5):177, citée par Fournioux J.C., 1997. Influences foliaires sur le développement végétatif de la vigne. *J. Int. Sci. Vigne Vin*. 31(4):165-183.
- Alleweldt G., 1963a. Perzeption und Translocation des photoperiodischen Reizes bei *Vitis*. *Angew. Bot.* 37:26-34, citée par Fournioux J.C., 1997. Influences foliaires sur le développement végétatif de la vigne. *J. Int. Sci. Vigne Vin*. 31(4):165-183.
- Alleweldt G., 1963b. Die Umweltabhängigkeit des vegetativen Wachstums, der Wachstumsruhe und der Blütenbildung von Reben (**Vitis** species). I. Die photoperiodischen Wachstumsreaktionen. 4(1):11-41, citée par Fournioux J.C., 1997. Influences foliaires sur le développement végétatif de la vigne. *J. Int. Sci. Vigne Vin*. 31(4):165-183.
- Alleweldt G., 1964. Die Wirkung des Störlichtes auf die photoperiodische Reaktion der Reben. *Vitis*. 4:357-364, citée par Fournioux J.C., 1997. Influences foliaires sur le développement végétatif de la vigne. *J. Int. Sci. Vigne Vin*. 31(4):165-183.
- Alleweldt G., Düring H., 1972. Der Einfluss der Photoperiode auf Wachstum und Abscisinsaeuregehalt der Rebe. *Vitis*. 11:280-288.
- Alleweldt G., Eibach R., Ruehl E., 1982. Investigations on gas exchange in grapevine. I. Influence of temperature, leaf age and daytime on net photosynthesis and transpiration. *Vitis*. 21:93-100.
- Ameglio T., Archer., 1996. Représentativité du potentiel de base sur sols à humidité hétérogène (Significance of predawn water potential in heterogeneous soil water content distribution). *Agronomie*. 16(8):493-503.
- Antonioletti R., 1986. Contribution à l'étude du Mont Ventoux. *Notes de l'INRA*. 42pp.
- Archer E., Strauss H.C., 1989. The effect of plant spacing on the water status of soil and grapevines. *S. Afr. J. Enol. Vitic.* 10(2):49-58.
- Baggiolini M., 1952. Les stades repères dans le développement annuel de la vigne et leur utilisation pratique. *Rev. Romande Agric. Vitic. Arbor.* 8:4-6.
- Baldwin J.C., 1964. The relation between weather and fruitfulness of the Sultana vine. *Aust. J. Grape Wine Res.* 15:920-928.
- Barbeau G., Maite C., Sinaeve H., 1998. Evolution de la surmaturation du cépage Chenin dans différents terroirs des coteaux du Layon en relation avec les variables agroviticoles. *Simposio Internazionale Territorio et Vino, Siena (Italia)*. 431-441pp.
- Baret F., 1986. Contribution au suivi radiométrique de cultures de céréales. *Thèse pour obtenir le degré de docteur de l'Université Paris-Sud-Orsay*. 182pp.
- Bates T., Dunst R., Joy P., 2002. Seasonal dry Matter, starch, and nutrient distribution in "Concord" Grapevine Roots. *HortScience*. 37(2):313-316.

- Bernstein Z., 1984. L'amélioration de la régulation de débourrement dans les régions à hiver doux. *Bull. OIV*. 57:478-488.
- Bidabe B., 1965a. Contrôle de l'époque de floraison du pommier par une nouvelle conception de l'action des températures. *Compte rendu des séances de l'Académie d'Agriculture de France, Tome XLIX*. 934-945 pp.
- Bidabe B., 1965b. L'action des températures sur l'évolution des bourgeons de l'entrée en dormance à la floraison. *96^{ème} Congrès Pomologique*. 51-56 pp.
- Bindi M., Miglietta, F., Gozzini, B., Orlandini, S., Seghi, L., 1997a. A simple model for simulation of growth and development in grapevine (*Vitis vinifera* L.). I. Model description. *Vitis*. 36(2):67-71.
- Bindi M., Miglietta F., Gozzini B., Orlandini S., Seghi L., 1997b. A simple model for simulation of growth and development in grapevine (*Vitis vinifera* L.). II. Model Validation. *Vitis*. 36(2):73-76.
- Bindi M., Fibbi L., Lanini M., Miglietta F., 2000a. Effects of elevated carbon dioxide on grapevine. In Climate Change, climatic variability and agriculture in Europe. An integrated assessment. *Research report N° 21*. Ed: Downing T.E., Harrison P.A., Butterfield R.E., Lonsdale K.G. 71-81pp.
- Bindi M., Fibbi L., 2000b. Modelling climate change impacts at the site scale on grapevine. In Climate Change, climatic variability and agriculture in Europe. An integrated assessment. *Research report N° 21*. Ed: Downing T.E., Harrison P.A., Butterfield R.E., Lonsdale K.G. 117-134pp.
- Bindi M., Fibbi L., Maselli F., Miglietta F., 2000c. Modelling climate change impacts on grapevine in Tuscany. In Climate Change, climatic variability and agriculture in Europe. An integrated assessment. *Research report N° 21*. Ed: Downing T.E., Harrison P.A., Butterfield R.E., Lonsdale K.G. 191-216pp.
- Bindi M., Fibbi L., Lanini M., Miglietta F., 2001a. Free Air CO₂ Enrichment (FACE) of grapevine (*Vitis vinifera* L.): I. Development and testing of the system for CO₂ enrichment. *European Journal of Agronomy*. 14(2):135-14.
- Bindi M., Fibbi L., Miglietta F., 2001b. Free Air CO₂ Enrichment (FACE) of grapevine (*Vitis vinifera* L.): II. Growth and quality of grape and wine in response to elevated CO₂ concentrations. *European Journal of Agronomy*. 14(2):145-155.
- Bioletti F.C., Winkler A.J., 1934. Density and arrangement. of vines. *Hilgardia*. 8:179-95, citée dans Champagnol F., 1984. *Eléments de physiologie de la vigne et viticulture générale*. F. Champagnol, Saint-Gely-du-Fesc, France. 352pp.
- Bonhomme R., 2000. Bases and limits to using "degree-day" units. *European Journal of Agronomy*. 13:1-10.
- Bota J., Flexas J., Medrano H., 2001. Genetic variability of photosynthesis and water use in Balearic grapevine cultivars. *Annals of Applied Biology*. 13:353-361.
- Bouchet R.J., 1962. Le problème de la défense des végétaux contre les gelées. *B.T.I.* 167:281-291, citée par Champagnol F., 1984. *Eléments de physiologie de la vigne et viticulture générale*. Champagnol F., Saint-Gely-du-Fesc, France. 352 pp.
- Brisson N., Olliso A., Clastre P., 1993. Daily transpiration of field soybeans as related to hydraulic conductance, root distribution, soil potential and midday leaf potential. *Plant and Soil* 154: 227-237.
- Brisson N., 1998. An analytical solution for the estimation of the critical soil water fraction for the water balance under growing crops. *Hydrology and Earth System Science* 2: 221-231.
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Nicoulaud B., Gate P., Devienne-Baret F., Antonioletti R., Durr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J.M., Meynard J.M., Delecolle R., 1998a. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*. 18:311-346.
- Brisson N., Itier B., L'hotel J.C., Lorendeau J.Y., 1998b. Parameterization of the Shuttleworth-Wallace model to estimate daily maximum transpiration for use in crop models. *Ecological Modelling*, 107:159-169.

- Brisson N., Ruget F., Gate P., Lorgeou J., Nicoullaud B., Tayot X., Plenet D., Jeuffroy M.H., Bouthier A., Ripoche D., Mary B., Justes E., 2002a. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and corn. *Agronomie*. 22:69-93.
- Brisson N., Gaudillère J.P., Ramel J.P., Vaudour E., 2002b. Use of the STICS crop model as a tool to inform vineyard zonages. *Proceedings du 4ème Symposium International du zonage vitivinicole. France. CD edited OIV*. 9pp.
- Brisson N., 2002c. Notices concepts et formalismes STICS version 5.0. *INRA-Bioclimatologie Avignon ed.* 119pp.
- Brisson N., 2002d. Notices entrées-sorties STICS version 5.0. *INRA-Bioclimatologie Avignon ed.* 119pp.
- Brisson N., Seguin B., Prevoit L., Durr C., Cellier P., Richard G., 2002e. About the crop temperature as simulated by the STICS model. *Proceedings of 7th European Society for Agronomy, Spain*. 251-252pp.
- Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger P., Bussièrè F., Cabidoche Y.M., Cellier P., Debaeke P., Gaudillère J.P., Maraux F., Seguin B., Sinoquet H., 2003. An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*. 18:309-332.
- Brisson N., Bussièrè F., Ozier-Lafontaine H., 2004. Adaptation of the crop model STICS to intercropping : Theoretical basis and parameterisation. *Agronomie*. 24:409-421.
- Brisson N., Juin S., Desfonds V., García de Cortázar Atauri I., Lebonvallet S., Ripoche D., Sappe G., Bes B., Bruchou C., Guerif M., Durr C., Launay M., 2005. Quelles composantes environnementales et génétiques pour l'élaboration de la qualité du blé dur en région PACA ? Approche couplée expérimentation – modélisation. *Bilan d'un programme de recherche 2001-2005*. 2 Vol. 45pp + 45pp.
- Brisson N., Lemaire G., Célette F., García de Cortázar Atauri I., 2006. Représentation du statut azoté de la vigne par application des nouveaux formalismes de STICS. Programme CEAPC. *Communication Interne*. 6pp.
- Buttrose M.S., 1968. Some Effects of Light Intensity and Temperature on Dry Weight and Shoot Growth of Grape-Vine. *Annals of Botany*. 32:753-765.
- Caprio J.M., Quamme H.A., 2002. Weather conditions associated with grape production in the Okanagan Valley of British Columbia and potential impact of climate change. *Can. J. Plant Sci.* 82:755-763.
- Cahurel J.Y., Carbonneau A., Dufourcq T., De la Bretesche A., Morlat R., Murisier F., Schneider C., 2005. Principes généraux sur la conduite du vignoble. La vigne en espalier (un plan de palissage). Premier rapport de la Commission d'experts "Mode de conduite du vignoble". *Commission technique du Comité National vins et eaux-de-vie*. 19pp.
- Carbonneau A., 1976. Principes et méthode de mesure de la surface foliaire. Essai de caractérisation des types de feuilles dans le genre *Vitis*. *Annales de l'amélioration des plantes*. 23(2):327-343.
- Carbonneau A., Riou C., Guyon D., Riom J., Schneider C., 1992. Agrométéorologie de la vigne en France. *EUR-OP, Luxembourg*. 168pp.
- Carbonneau A., 2000. Éléments de la conduite du vignoble favorisant la protection du terroir et l'expression de ses vins. Conférence XXV^{ème} Congrès Mondial de la Vigne et du Vin de l'OIV à Paris (19-23 juin 2000). ([url: http://www.acenologia.com/ciencia59_03fr.htm#note](http://www.acenologia.com/ciencia59_03fr.htm#note)).
- Carbonneau A., Deloire A., Costanza P., 2004. Le potentiel hydrique foliaire: sens des différentes modalités de mesure. *J. Int. Sci. Vigne Vin*. 38(1):15-19.
- Castelan-Estrada M., 2001 Répartition de la Biomasse chez *Vitis vinifera* L.. Rendement de Conversion du Rayonnement Solaire Global et Coûts Energétiques. *Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Institut national Agronomique de Paris*. 132 pp.
- Castelan-Estrada M., Vivin P., Gaudillere J.P., 2002. Allometric relationships to estimate seasonal above-ground vegetative and reproductive biomass of *Vitis vinifera* L. *Annals of Botany* 89:401-408.

- Castéran P., Carbonneau A., Leclair Ph., 1980. Structure des populations de vigne: analyse des phénomènes de compétition entre plantes. *Vitis*. 19:121-133.
- Celette F., Valdez H., Gary C., García de Cortázar Atauri I., Ortega-Farias S., Acevedo C., 2006. Evaluation of the STICS model for simulating vineyard water balance under two different water management policies. *Soumis Acta Horticulturae*.
- Cesaraccio C., Spano D., Snyder R.L., Duce P., 2004. Chilling and forcing model to predict bud-burst of crop and forest species. *Agricultural and forest meteorology*. 126:1-13.
- Champagnat P., 1970. Quelques aspects de la dormance chez les végétaux. *Colloque dispauses-dormance du groupe d'étude des rythmes biologiques. Clermont-Ferrand*.
- Champagnol F., 1984. Eléments de physiologie de la vigne et viticulture générale. *Champagnol F., Saint-Gely-du-Fesc, France*. 352pp.
- Chapman J., 2004. *Geotimes*. 50(7):27.
- Chevet J.M., Soyer J.P., 2006. Phénologie et climat dans le Haut-Médoc (1800-2005). *Actes du VI^{ème} Congrès International des Terroirs Viticoles. Bordeaux-Montpellier*. 46-51pp.
- Choné X., Tregoat O., Van Leeuwen C., Dubourdiou D., 2000. Déficit hydrique modéré de la vigne: parmi les 3 applications de la chambre à pression, le potentiel tige est l'indicateur le plus précis. *J. Int. Sci. Vigne Vin*. 34(4):169-176.
- Choné X., Tregoat O., Van Leeuwen C., 2001a. Stem water potential is a better indicator than leaf water potentials to survey and to manage field grown vine water deficits. *Comptes-rendus GESCO (groupe européen d'étude des systèmes de conduite de la vigne), 12^{èmes} journées, vol 1, 3-7 juillet, Montpellier*. 49-55pp.
- Choné X., Van Leeuwen C., Dubourdiou D., Gaudillère J.P., 2001b. Stem Water Potential is a Sensitive Indicator of Grapevine Water Status. *Annals of Botany*. 87:477-483.
- Chuine I., 2000. A unified model for budburst of trees. *J. theor. Biol.*. 207:337-347.
- Chuine I., Yiou P., Viovy N., Seguin B., Daux V., Le Roy Ladurie E., 2004. Grape harvest dates and temperatures variations in eastern France since 1370. *Nature*. 432:289-290.
- Clapp R.B., Hornberger G.M., 1978. Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Water resources research*. 14(4):601-604.
- Conradie W.J., 1980. Seasonal uptake of nutrients by Chenin blanc in sand culture. I. Nitrogen. *S. Afric. J. Enol. Vitic.* 1:59-65.
- Conradie W.J., 1986. Utilization of nitrogen by the grapevine as affected by time of application and soil type. *S. Afric. J. Enol. Vitic.* 7:76-83.
- Coombe B.G., Dry P.R., 1988. Viticulture. Vol. 1 Ressources, *Adelaide; Winetitles*. 211pp.
- Coombe B.G., 1992. Research on Development and Ripening of the Grape Berry. *Amer. J. Enol Vitic.* 43:101-110.
- Coombe B.G., 1995. Adoption of a system for identifying grapevine growth stages. *Aust. J. Grape Wine Res.* 1:100-110.
- Coombe B.G., McCarthy M.G., 2000. Dynamics of grape berry growth and physiology of ripening. *Aust. J. Grape Wine Res.* 6:131-135.
- Costa Leme P., Pacheco C.A., Malheiro P.R., 2005. Rootstock's influence in root distribution along the soil profile. *Proceedings of 4th Gesco. Vol II. Germany*. 203-210pp.
- Coulon C., 2006. Etude sur l'utilisation du modèle de culture dynamique stics-vigne et de l'indice de site de Tesic dans le vignoble du Val de Loire. *Mémoire Fin d'Etudes ENSHAP-INH*. 30pp.
- Crepinsek, Z., Kajfez-Bogataj L., Bergant K., 2006. Modelling of weather variability effect on fitophenology. *Ecological modelling*. 194:256-265.

- De Melo-Abreu J.P., Barranco D., Cordeiro A.M., Tous J., Rogado B.M., Villalobos F.J., 2004. Modelling olive flowering date using chilling for dormancy release and thermal time. *Agricultural and forest meteorology*. 125:117-127.
- De Munter I., 2004. L'utilisation du potentiel foliaire de base comme outil d'aide au paramétrage du modèle de culture STICS-vigne. Mémoire de fin d'étude. *ISARA-Lyon*. 87pp.
- De Tessieres R., 2002. Le bilan hydrique viticole. Optimisation et essai de validation. *Mémoire de fin d'études, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier*. 32pp.
- Delas J., 1989. La fertilisation des vignobles de qualité. *Connaissance Vigne Vin, n° hors série*. 33-36pp, citée par Thiébeau P., Herre C., Doledéc A.F., Perraud A., Panigai L., Mary B., Nicolardot B., 2005. Incidence du mode de couverture du sol sur la fourniture en azote des sols de vigne en Champagne. *J. Int. Sci. Vigne Vin*. 39:163-177.
- Deloire A., Kraeva E., Martin M., Hunter J.J., 2005. Sugar loading and phenolic accumulation as affected by ripeness level of Syrah/R99 grappes. *Proceedings of 4th Gesco. Vol II. Germany*. 574-580pp.
- Delpuech X., 2003. Essai Réserve. Bibliographie et résultats de la Campagne 2003. *CIVC*. 67pp.
- Delpuech X., Le Sueur D., Langellier F., Panigai L., Panon M.L., Perraud A., Duron B., Debuissou B., Boulay M., Lesne Ph., Guardiola M., 2004. Suivi d'étude Terroir Champagne en 2004. *CIVC*. 32pp.
- Déqué M., Drevet C., Braun A., Cariolle D., 1994. The ARPEGE/IFS atmospheric model: A contribution to the French Community climate modelling. *Climate Dyn.* 10:249-266.
- Déqué M., Marquet P., Jones R.G., 1998. Simulation of climate change over Europe using a global variable resolution general circulation model. *Climate Dyn.* 14:173-189.
- Déqué M., Jones R.G., Wild M., Giorgi F., Christensen J.H., Hassell D.C., Vidale P.L., Rockel B., Jacob D., Kjellström E., De Castro M., Kucharski F., Van den Hurk B., 2005. Global high resolution versus Limited Area Model climate change projections over Europe: quantifying confidence level from PRUDENCE results. *Climate Dyn.* 25:653-670.
- Dokoozlian N.K., Kliewer W.M., 1996. "Influence of light on grape berry growth and development varies during fruit development," *Jour. of the Amer. Society of Horticultural Science*. 121:869-874.
- Dokoolzian N.K., Bergqvist J.A., 2001. Influence of sunligh exposure on the berry growth and composition of two reds cultivars. *In Proceedings of the 12th GESCO Conference (Montpellier)*. 1:77-84.
- Dolédec A.F., Langellier F., Panigai L., Rinville Ch., Duron B., Palgé Cl., Schleifer B., 1998. Suivi d'entude Terroir Champagne en 1998. *CIVC*. 31pp.
- Dolédec A.F., Langellier F., Panigai L., Rinville Ch., Duron B., Palgé Cl., Boulay M., Lesne, Ph., Métayer F., 1999. Suivi d'étude Terroir Champagne en 1999. *CIVC*. 27pp.
- Dolédec A.F., Langellier F., Panigai L., Panon M.L., Duron B., Palgé Cl., Boulay M., Lesne Ph., Métayer F., 2000. Suivi d'entude Terroir Champagne en 2000. *CIVC*. 34pp.
- Dolédec A.F., Langellier F., Panigai L., Panon M.L., le Sueur D., Perraud A., Duron B., Palgé Cl., Boulay M., Lesne Ph., Métayer F., 2001. Suivi d'entude Terroir Champagne en 2001. *CIVC*. 26pp.
- Dolédec A.F., Langellier F., Panigai L., Panon ML., le Sueur D., Perraud A., Duron B., Palgé Cl., Boulay M., Lesne Ph., Guardiola M., 2002. Suivi d'entude Terroir Champagne en 2002. *CIVC*. 28pp.
- Dolédec A.F., Delpuech X., Langellier F., Panigai L., Panon M.L., le Sueur D., Perraud A., Duron B., Debuissou B., Boulay M., Lesne Ph., Guardiola M., 2003. Suivi d'entude Terroir Champagne en 2003. *CIVC*. 36pp.
- Domergue M., Seguin B., Baculat B., Legave J.M., Brisson N., 2003. Suivre l'impact du climat sur les arbres fruitiers et la vigne. La base de données Phenoclim. *INRA Mensuel*. 116:12-16.
- Dorsainvil F., 2002. - Evaluation par modélisation, de l'impact environnemental des modes de conduite des cultures intermédiaires sur les bilans d'eau et d'azote dans les systèmes de cultures. *INRA/INA-PG*. 140pp.

- Downing T.E., Harrison P.A., Butterfield R.E., Lonsdale K.G., 2000. Climate Change, variability and agriculture in Europe. *Environmental Unit. University of Oxford, UK*. 445pp.
- Douguedroit A., 1987. Les topoclimats thermiques de moyenne montagne. Agrométéorologie des régions de moyenne montagne. *Les colloques de l'INRA*. 39:197-213.
- Drake B.G., González-Meler M.A., Long S.P., 1997. More efficient plants: a consequence of rising atmospheric CO₂? *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. 48:609-639.
- Ducharne A., Théry S., Viennot P., Ledoux E., Gomez E., Déquéet M., 2004. Projet GICC-Seine, Influence du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique et biogéochimique du bassin de la Seine. *Rapport final*. 60pp.
- Duchêne E., Monamy C., Langellier F., Jaegli N., Salber R., Meluc D., Panigai L., 2003. Incidence au vignoble des conditions de maturation sur l'élaboration du rendement au cours de la saison suivante. *J. Int. Sci. Vigne Vin*. 37(2):103-116.
- Duchêne E., Schneider C., 2005. Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace. *Agron. Sustain. Dev*. 25:93-99.
- Echeverria I., 2006. Rapport sur l'impact du changement climatique sur le tassement des sols. *Rapport interne*. 40pp
- EEA, 2004. Impacts of Europe's changing climate. *Rapport N° 2*. 107pp.
- Eichhorn K.W., Lorenz D.H., 1977. Phönologische entwicklungsstadien der rebe. Nachrichtenbl. Dtsch. Pflanzenschutzd. *Braunschweig*. 29:119-120.
- Escalona J.M., Flexas J., Bota J., Medrano H., 2003. Distribution of the leaf photosynthesis and transpiration within grapevine canopies under different drought conditions. *Vitis*. 42(2):57-64.
- Flenet F., Villon P., Ruget F., 2005. Methodology of adaptation of the STICS model to a new crop: spring linseed (*Linum usitatissimum*, L.). *Agronomie*. 24:367-381.
- Fournier B., 2004. Détermination de l'effet terroir dans la physiologie de la vigne: description du sol sur un réseau de parcelles d'Ugni Blanc dans les Charentes. *Mémoire Fin d'Etudes DESS COGEST*. 102pp.
- Fournioux J.C., 1997. Influences foliaires sur le développement végétatif de la vigne. *J. Int. Sci. Vigne Vin*. 31(4):165-183.
- Freeman B.M., Smart R.E., 1976. A root observation laboratory for studies with grapevines. *Amer. J. Enol Vitic*. 27(1):36-39, cité par Champagnol F., 1984. Eléments de physiologie de la vigne et viticulture générale. *Champagnol F., Saint-Gely-du-Fesc, France*. 352 pp.
- Fregoni C., Pezzutto S., 2000. Principes et premières approches de l'indice bioclimatique de qualité de Fregoni. *Progrès Agricole et Viticole*. 117(18):390-396.
- Gadoury D.M., Seem R.C., Kennelly M.M., Wilcox W.F. 2003. Climate-based temporal heterogeneity in flowering and the distribution of ontogenic resistance to major fruit diseases of grapevine. *Phytopathology* 93:S28.
- Galet P., 1976. Précis de Viticulture. *Dehan, Montpellier, France*. 584 pp.
- Galet P., 1991. Précis d'ampélographie pratique. *Galet P (ed) 6^{ème} edn. Montpellier*. 257pp.
- Gamboa E., 2005. Etude de la méthodologie pour l'utilisation de données climatiques simulées futures dans le cadre d'une étude d'adaptation de la vigne au changement climatique. *Rapport interne*. 44pp.
- Ganichot B., 2002. Evolution de la date des vendanges dans les Côtes-du-Rhône méridionales. 6èmes Rencontres Rhodaniennes. *Ed. Institut Rhodanien. Orange, France*. 38-41pp.
- García de Cortázar Aauri I., Brisson N., Seguin B., 2004. Estimation de l'impact du changement climatique sur les résultats agronomique de la vigne avec le modèle STICS. *Actes Mondiaiviti, ITV ed. France*. 151-159pp.
- García de Cortázar Aauri I., Brisson N., Seguin B., Gaudillere J.P., Baculat B., 2005. Simulation of budbreak date for vine. The BRIN model. Some applications in climate change study. *In: Proceedings of GESCO. Vol. 2. August 2005. Geisenheim, Germany*. 485-490 pp.

- García de Cortázar Atauri I., 2006. Impacts sur le vignoble, perspectives. Le Changement climatique: quelles conséquences pour l'agriculture et la sylviculture régionales? *Rencontre Chercheurs/Professionnels*. 2 février. INRA. Avignon.
- García de Lujan Gil de Bernabe A., Gil Monreal M., 1982. Sobre la distribución del sistema radicular de la vid. *Inst. Nacional de Investigaciones Agrarias*. 20:35-67, Cité par Champagnol F., 1984. *Eléments de physiologie de la vigne et viticulture générale*. Champagnol F., Saint-Gely-du-Fesc, France. 352pp.
- Gary C., Brisson N., Gaudillere J.P., Duarte M., 2003. Modélisation d'une espèce ligneuse pérenne à fruits charnus: la vigne. *Séminaire STICS, Arles (janvier 2003)*. 36-37pp.
- Gate P., 1996. Ecophysiologie du blé : de la plante à la culture. *ITCF & Lavoisier (eds)*. 429pp.
- Gaudillere J.P., Van Leeuwen C., Ollat N., 2002. Carbon isotope composition of sugars in grapevine, an integrated indicator of vineyard water status. *J. Exp. Bot.*. 53:757-763.
- Ghiloufi M., 1999. Méthodologie d'adaptation de STICS à de nouvelles cultures : application au tournesol et à la betterave à sucre. *Mémoire de DAA INA-PG*, 43 p.
- Gibelin A.L., Déqué M., 2001a. Un scénario à l'échelle de l'Europe pour le climat de la fin du XXI^{ème} siècle. Centre National de Recherches Météorologiques – Groupe de travail de grande échelle et climat. *Météo France*. 60pp.
- Gibelin A.L., Déqué M., 2001b. Simulated anthropogenic climate change over the Mediterranean area: the role of horizontal resolution in the model response. Centre National de Recherches Météorologiques – Groupe de travail de grande échelle et climat. *Météo France*. 37pp.
- Gibelin A.L., Déqué M., 2003. Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Climate Dyn.*. 20(4):327-339.
- Gilreath P.R., Buchanan D.W., 1981. Rest prediction model for low-chilling sungold nectarine. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 106:426-429.
- Gourieroux A., 2003. Etude des relations source-puits et de l'équilibre carbone-azote (rapport C/N) chez la vigne. *Mémoire pour l'obtention du DEA Œnologie-Ampélogie, Faculté d'œnologie de Bordeaux*. 37pp.
- Goudriaan J., 1986. Boxcartrain methods for modelling of ageing, development, delays and dispersion. In: *The dynamics of physiologically structured populations*. Metz J.A.J. and Diekman O. (eds), Springer-Verlag, Berlin. 543-473pp.
- Greenspan M.D., Schultz H.R., Matthews M.A., 1996. Field evaluation of water transport in grape berries during water deficits. *Physiologia Plantarum*. 97:55-62.
- Greenwood D.J., Neeteson J.J., Draycott A., 1985. Response of potatoes to N fertilizer: dynamic model. *Plant and Soil*. 85:85-203.
- Gruber B.R., Schultz H.R., 2005. Coupling of plant to soil water status in different vineyard sites. *Acta Horticulturae*. 689:381-390.
- Gutierrez A.P., Williams D.W., Kido H., 1985. A model of grape growth and development: the mathematical structure and biological considerations. *Crop Science*. 25:721-728.
- Harrison P.A., Butterfield R.E., Downing T.E., 1995. Climate Change and agriculture in Europe. Assessment of Impacts and Adaptation. *Environmental Unit. University of Oxford, UK*. 411pp.
- Hidalgo L., Candela M.R., 1969. Morphologie racinaire de la vigne. Instituto nacional de investigaciones, Madrid, cité dans Champagnol F., 1984. *Eléments de physiologie de la vigne et viticulture générale*. Champagnol F., Saint-Gely-du-Fesc, France. 352 pp.
- Houlès V., 2004. Mise au point d'un outil de modulation intra-parcellaire de la fertilisation azotée du blé d'hiver basé sur la télédétection et un modèle de culture. *Thèse pour obtenir le titre de Docteur de l'Institut National Agronomique de Paris-Grignon*. 320pp.
- Huglin P., 1978. Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques de la vigne. *C.R. Acad. Agric. Fr.* 1117-1126pp.

- Huglin P., Schneider C., 1998. Biologie et écologie de la vigne. *Lavoisier, Paris*. 370pp.
- Hunter J.J., 2000. Plant spacing effects on root growth and dry matter partitioning of *Vitis vinifera* L. cv. Pinot noir/99 Richter and implications for soil utilisation. *Acta Horticultrae*. 526:63-74.
- Iandolino A.B., Pearcy R.W., Williams L.E., 2004. Modelling whole canopy light interception and carbon gain of *Vitis vinifera* L. Under conditions of water and nitrogen stress. *Communication Orale. 7th International Symposium of vineyard physiology and biotechnology. 21-25 juin Davis (USA)*.
- Idso S.B., 1991. A general relationship between CO₂-induced increases in net photosynthesis and concomitant reductions in stomatal conductance. *Environmental and Experimental Botany*. 31:381-383
- INRA, 2004. Impacts de la canicule 2003 sur la vigne et le vin. Fiche presse info Janvier-Février. Site Internet: [http://www.inra.fr/presse/impacts_de_la_canicule_2003_sur_la_vigne_et_le_vin]
- Ionescu E.M., 1978a. Quelques aspects relatifs à l'influence de certains facteurs pédoécologiques sur l'appareil racinaire de la vigne. Ecologie de la vigne. Ier Symposium International, cité dans Champagnol F., 1984. Eléments de physiologie de la vigne et viticulture générale. *Champagnol F., Saint-Gely-du-Fesc, France*. 352pp.
- Ionescu E.M., Budan C., Calistru G.H., Pomohaci N., Pituc P., Popa G.H., Vladu C.R., 1978b. Particularités du développement de l'appareil racinaire de la vigne, induites par le spécifique écologique du sol. Ecologie de la vigne. Ier Symposium International, cité dans Champagnol F., 1984. Eléments de physiologie de la vigne et viticulture générale. *Champagnol F., Saint-Gely-du-Fesc, France*. 352pp.
- IPCC, 2001. Climate Change, 2001: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of the Working Group II to the third assessment report of IPCC. *Cambridge University Press, Cambridge*.
- Jones J.W., Dayan E., Allen L.H., van Keulen H., Challa H., 1991. A dynamic tomato growth and yield model (TOMGRO). *Trans. ASAE*. 34:663-672.
- Jones G.V., Davis R.E., 2000. Climate Influences on Grapevine Phenology, Grape Composition, and Wine Production and Quality for Bordeaux, France. *Amer. J. Enol Vitic*. 51(3):249-261.
- Jones G.V., Hille P., Pine J., Jones H.E., 2002. Mapping Varietal Potential for Quality Wines in Oregon using PRISM Spatial Climate Data. *Proceedings from the 13th Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society. Portland, Oregon, May 2002*.
- Jones G.V., 2003. Winegrape Phenology. In *Phenology: An Integrative Environmental Science 1st Edition*, Mark D. Schwartz, Editor. *Kluwer Press*.
- Jones G.V., Nelson P., Snead N., 2004a. Modeling Viticultural Landscapes: A GIS Analysis of the Terroir Potential in the Umpqua Valley of Oregon. *GeoScience Canada*. 31(4):167-178.
- Jones G.V., White M.A., Cooper O.R., Storchmann K.H., 2004b. Climate and Wine: Quality Issues in a Warmer World. *Proceedings of the Vineyard Data Quantification Society's 10th Œonometrics Meeting. Dijon, France, May*.
- Jones G.V., White M.A., Cooper O.R., Storchmann K., 2005a. Climate Change and Global Wine Quality. *Climatic Change*. 73(3):319-343.
- Jones G.V., Duchene E., Tomasi D., Yuste J., Braslavksa O., Schultz H., Martinez C., Boso S., Langellier F., Perruchot C., Guimberteau G., 2005b. Changes in European Winegrape Phenology and Relationships with Climate. *Proceedings of 4th Gesco. Vol. I. Germany*. 55-62pp.
- Justes E., Mary B., Meynard J.M., Machet J.M., Thelier-Huche L., 1994. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Annals of Botany*. 74:397-407.
- Katerji N., Hallaire M., 1984. Les grandeurs de référence utilisables dans l'étude de l'alimentation en eau des cultures. *Agronomie*. 4(10):999-1008.
- Keller M., Hess B., Schwager H., Scharer H., Koblet W., 1995. Carbon and nitrogen partitioning in *Vitis vinifera* L.: responses to nitrogen supply and limiting irradiance. *Vitis*. 34:19-26.

- Kenny G.J., Harrison P.A., 1992. The effect of climate variability and change on grape suitability in Europe. *J. of Wine Research*. 3:163-183.
- Kimball B.A., 1983. Carbon dioxide and agricultural yield: an assemblage and analysis of 430 prior observations. *Agronomy Journal*. 75:779-788.
- Kimball B.A., Mauney J.R., Nakayama F.S., Idso S.B., 1993. Effects of increasing atmospheric CO₂ on vegetation. *Vegetatio*. 104/105:65-75.
- Kliewer W.M., Torres R.E., 1972. Effect of controlled day and night temperatures on grape coloration. *Amer. J. Enol Vitic*. 23(2):71-77.
- Kozlowski T.T., Pallardy S.G., 1996. Photosynthesis. In: Physiology of woody plants, 2nd edn. *Academic Press, San Diego*. 87-132pp.
- Kriedmann P.E., Smart R.E., 1971. Effects of irradiance, temperature and leaf water potential on photosynthesis of vine leaves. *Photosynthetica*. 5:6-15.
- Lakso A.N., Poni S., 2005. "VITISIM"- a simplified carbon balance model of a grapevine. *Proceedings of 4th Gesco. Vol. I. Germany*. 478-484pp.
- Lang G.A., Early J.D., Martin G.C., Darnell R.L., 1987. Endo-, Para-, and Ecodormancy: physiological terminology and classification for dormancy research. *HortScience*. 22(3):371-377.
- Launay M., Flenet F., Ruget F., Garcia de Cortazar Auri I., 2005. Généricité et méthodologie d'adaptation de STICS à de nouvelles cultures. *Séminaire STICS, Carry-le-Rouet (mars 2005)*. 55-57pp.
- Le Sueur D., Langellier F., Panigai L., Panon M.L., Perraud A., De Almeida A., Tonnellier A., Duron B., Debuissou B., Boulay M., Lesne Ph., Guardiola M., 2005. Suivi d'étude Terroir Champagne en 2005. *CIVC*. 19pp.
- Leblois E., 2004. Etude des impacts potentiels du changement climatique sur le bassin versant du Rhône en vue de leur gestion. *Rapport final, Programme GICC1 2/00*.
- Lebon E., 2002. Changements climatiques: quelles conséquences prévisibles sur la viticulture ? *6èmes Rencontres Rhodaniennes. Ed. Institut Rhodanien. Orange, France*. 31-36pp.
- Lebon E., Dumas V., Piéri P., Shultz R.H. 2003. Modelling the seasonal dynamics of the soil water balance of vineyards. *Functionnal Plant Biology*. 30:699-710.
- Lebon G., Duchêne E., Brun O., Clément C., 2005. Phenology of Flowering and Starch Accumulation in Grape (*Vitis vinifera* L.) Cuttings and Vines. *Annals of Botany* 95:943-948.
- Lebon E., Pellegrino A., Louarn G., Lecoœur J., 2006. Branch development controls leaf area dynamics in grapevine (*Vitis vinifera* L.) growing in drying soil. *Annals of Botany* 98:175-185.
- Lebonvallet S., 2002. Simulation de l'azote chez le blé dur et impacts des changements climatiques. *Mémoire de DEA de l'Institut Nationale Agronomique Paris-Grignon*. 28pp.
- Lecoq R., 2002. Paramétrisation du modèle STICS vigne reposant sur quelques situations caractéristiques du vignoble des Côtes du Rhône méridionales. *Mémoire de fin d'étude, ENITA Bordeaux*. 60pp.
- Legave J.M., 2005. Impacts du réchauffement climatique sur la phénologie et le potentiel de floraison chez les arbres fruitiers. *Rencontre Chercheurs/Professionnels. 2 février. INRA. Avignon*.
- Lemaire G., Meynard J.M., 1997. Use of the nitrogen nutrition index for the analysis of agronomical data. *Lemaire, G. (Editeur). Diagnosis of the nitrogen status in crops. Springer-Verlag, Berlin (DEU)*. 45-55pp.
- Lemaire G., Gastal F., Plénet D., 1997. Dynamics of N uptake and N distribution in plant canopies. Use of crop N status index in crop modelling. In: *Diagnostic Procedures for Crop N Management. Eds G Lemaire and I G Burns. 15-29pp. INRA, Paris*.
- Lemaire G., Brisson N., 2005. Courbes de dilution de l'azote: formalisation du passage de la plante isolée au peuplement dense. *Séminaire STICS, Carry-le-Rouet (mars 2005)*. 15-30pp.

- Liennard M.E., 2002. Contribution à l'étude de la prévision de la précocité de floraison et du déterminisme climatique des nécroses florales de l'Abricotier, *Prunus armeniaca* L., dans le contexte des changements climatiques. *Mémoire Fin d'Etudes - Institut National d'Horticulture*. 55pp.
- Litvinov P.I., 1971. Sur les moyens de diriger la croissance et le développement du système racinaire de la vigne. Physiologie de la vigne. *1^{er} symposium. Varna, Bulgarie*. 44-45pp, cité dans Champagnol F., 1984. *Eléments de physiologie de la vigne et viticulture générale. Champagnol F., Saint-Gely-du-Fesc, France*. 352 pp.
- Louarn G., 2005. Analyse et modélisation de l'organogenèse et de l'architecture du rameau de vigne (*Vitis vinifera* L.). *Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Institut national Agronomique de Montpellier*.
- Louarn G., Lebon E., Lecoeur J., 2005. "TOP-VINE", a topiary approach based architectural model to simulate vine canopy structure. *Proceedings of GESCO. Vol. 2. August 2005. Geisenheim, Germany*. 464-470pp.
- Mabrouk H., Carbonneau A., Sinoquet H., 1997a. Canopy structure and radiation regime in grapevine. I. Spatial and angular distribution of leaf area in two canopy systems. *Vitis*. 36:119-123.
- Mabrouk H., Sinoquet H., Carbonneau A., 1997b. Canopy structure and radiation regime in grapevine. II. Modelling radiation, interception and distribution inside the canopy. *Vitis*. 36:125-132.
- Mabrouk H., 1998. Influence de la vigueur et du système de conduite de la vigne (*Vitis vinifera* L.) sur sa structure géométrique et son microclimat lumineux en tant que facteurs de la qualité de la vendange. *Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Institut national Agronomique de Montpellier*.
- Madelin M., Beltrando G., 2006. Les recherches des géographes-climatologues sur les gelées printanières dans le vignoble de Champagne. *Actes du XI^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*. 385-390pp.
- Makowski D., Hillier J., Wallach D., Andrieu B., Jeuffroy M.H., 2006. Parameter estimation for crop models. *In Working with Dynamic Crop Models. Evaluation, Analysis, Parameterization, and Applications. Wallach D., Makowski D., Jones, J., Eds*. 462pp
- Manly B.F.J., 1991. Randomization, bootstrap and Monte Carlo methods in biology. *Chapman and Hall, London, UK*. 399pp.
- Marocke R., Balthazard J., Correge G., 1976. Exportations en éléments fertilisants des principaux cépages cultivés en Alsace. *C.R. Ac. Agric. Fr.*. 6:420-429, cité par Thiébeau P., Herre C., Doledec A.F., Perraud A., Panigai L., Mary B., Nicolardot B., 2005. Incidence du mode de couverture du sol sur la fourniture en azote des sols de vigne en Champagne. *J. Int. Sci. Vigne Vin*. 39:163-177.
- Mary B., Beaudoin N., Justes E., Machet J.M., 1999. Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soil using a simple dynamic model. *Eur. J. Soil Sci.*. 50:549-566.
- Mary B., Guerif M., 2005. Effet du stress azoté sur la plante: définition d'un indice de nutrition instantané. *Séminaire STICS, Carry-le-Rouet (mars 2005)*. 23-27pp.
- Matthews M.A., Anderson M.M., 1988. Fruit ripening in *Vitis vinifera* L.: Responses to seasonal water deficits. *Amer. J. Enol Vitic.* 39:313-320.
- Matthews M.A., Shackel K.A., 2005. Growth and Water Transport in Fleshy Fruit. *In: Holbrook N.M., Zwieniecki M.A., eds. Vascular Transport in Plants*. 181-197pp.
- McCarthy M.G., 1997. The effect of transient water deficit on berry development of cultivar Shiraz (*Vitis vinifera* L.). *Aust. J. Grape Wine Res.* 3:102-108.
- McCarthy M.G., 1999. Weight loss from ripening berries of Shiraz grapevines (*Vitis vinifera* L. cv. Shiraz). *Aust. J. Grape Wine Res.* 5:10-16.
- McCarthy M.G., Coombe B.G., 1999. Is weight loss in ripening grape berries cultivar Shiraz caused by impeded phloem transport? *Aust. J. Grape Wine Res.* 5:17-21.
- McCarthy M.G., 2000. Developmental variation in sensitivity of *Vitis vinifera* L. (Shiraz) berries to soil water deficit. *Aust. J. Grape Wine Res.* 6:136-140.

- McIntyre G.N., Lider L.A., Ferrari N.L., 1982. The chronological classification of grapevine phenology. *Amer. J. Enol Vitic.* 33: 80-85.
- Medrano H., Bota J., Escalona J.M., Ribas-Carbo M., Flexas J., 2005. Variability of intrinsic water use efficiency in mediterranean grapevines. *Proceedings of GESCO. Vol. 2. August 2005. Geisenheim, Germany.* 513-520pp.
- Moncur M.W., Rattigan K., Mackenzie D.H., McIntyre G.N., 1989. Base temperatures for budbreak and leaf appearance of grapevines. *Amer. J. Enol Vitic.* 40(1):21-26.
- Morlat R., 1989. Le terroir viticole : contribution à l'étude de sa caractérisation et de son influence sur les vins ; application aux vignobles rouges de la Moyenne Vallée de la Loire. *Thèse d'Etat, Bordeaux II* ; tome I : 289pp ; tome II : 129pp.
- Moisselin J.M., Schneider M., Canellas C., Mestre, O. 2002. Les changements climatiques en France au XX^{ème} siècle : étude des longues séries homogénéisées de température et de précipitations. *La Météorologie.* 38:45-56.
- Moisselin J.M., Canelas M., Schneider M., Dubuisson B., 2003. Les longues séries de référence pour l'étude des changements climatiques. *Actes des journées AMA édités par Météo-France. Toulouse.* 95-98pp.
- Moulin C., 2006. Impact du changement climatique sur la conduite de systèmes agricoles rencontrés en Picardie à l'aide du modèle STICS. *Mémoire Fin d'études, Master Sciences et Technologies de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc et de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier.* 38pp.
- Murisier F., 1996. Optimisation du rapport feuille-fruit de la vigne pour favoriser la qualité du raisin et l'accumulation des glucides de réserves. Relation entre le rendement et la chlorose. *Zurich, Suisse, Ecole Polytechnique fédérale de Zurich.* 132pp
- Murisier F., Ferretti M., 1996. Densité de plantation sur le rang: effets sur le rendement et la qualité du raisin. Essai sur merlot au Tessin. *Revue suisse Viticole, Arboricole et Horticole.* 28(5):293-300
- Murisier F., Zufferey V., 2003. Influence de la densité de plantation sur le comportement agronomique de la vigne et sur la qualité des vins : essai sur Chasselas 1: Résultats agronomiques. *Revue suisse Viticole, Arboricole et Horticole.* 35(6):341-348.
- Murisier F., Zufferey V., 2004 ; Influence de la densité de plantation sur le comportement agronomique de la vigne et sur la qualité des vins : essai sur Chasselas 2: Résultats œnologiques. *Revue suisse Viticole, Arboricole et Horticole.* 36(1):45-49
- Nassar A.R., Kliwer W.M., 1966. Free amino acids in various parts of *Vitis vinifera* at different stage of development. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* 89:281-294.
- Nelder J.A., Mead R., 1965. A simplex method for function minimization. *Computer Journal.* 7:308-313.
- Nendel C., Kersebaum K.C., 2004. A simple model approach to simulate nitrogen dynamics in vineyard soils. *Ecological modelling.* 177:1-15.
- Nemani R.R., White M., Cayan D., Jones G.V., Running S.W., Coughlan J.C., Peterson D.L., 2001. Asymmetric warming over coastal California and its impact on the premium wine industry. *Climate research.* 19:25-34.
- Nigond J., 1957. Action de la température sur le développement et la croissance de la vigne à Montpellier. *Station Bioclim. Agr. Montpellier.* 20pp, cité par Champagnol F., 1984. Eléments de physiologie de la vigne et viticulture générale. *Champagnol F., Saint-Gely-du-Fesc, France.* 352pp.
- Nigond J., 1967. Recherches sur la dormance de la vigne. *Ann. Amélior. Veget.* 9: I:107-152; II:197-232; III:273-338.
- Ojeda H., 1999. Influence de la contrainte hydrique sur la croissance du péricarpe et sur l'évolution des phénols des baies de raisin (*Vitis vinifera* L.) cv. Syrah. *Thèse ENSAM pour l'obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences Agronomiques.* 159pp.
- Ojeda H., Deloire A., Carbonneau A., 2001. Influence of water deficits on grape berry growth. *Vitis.* 40:141-145.

- Ojeda H., Andary C., Kraeva E., Carbonneau A., Deloire A., 2002. Influence of pre- and postveraison water deficit on synthesis and concentration of skin phenolic compounds during berry growth of *Vitis vinifera* L. cv. Shiraz. *Amer. J. Enol Vitic.* 53:261-267.
- Ojeda H., Carrillo N., Deis L., Tisseyre B., Heywang M., Carbonneau A., 2005. Precision viticulture and water status II : quantitative and qualitative performance of different within field zones, defined from water potential mapping. *Proceedings of 4th Gesco. Vol. II. Germany.* 741-748pp.
- Olesen J.E., Bindi M., 2002. Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *European Journal of Agronomy* 16:239-262.
- Oliveira M., 1998. Calculation of budbreak and flowering base temperatures for *Vitis vinifera* cv. Touriga Francesa in the Douro Region of Portugal. *Amer. J. Enol Vitic.* 49(1):74-78.
- Ollat N., 1997. Bases physiologiques et anatomiques de la croissance des baies de *Vitis vinifera* cv Cabernet Sauvignon. *Thèse d'état de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier.*
- Ollat N., Fermaud M., Tandonnet J.P., Neveux M., 1998. Evaluation of an indirect method for leaf area index determination in the vineyard: combined effects of cultivar, year and training system. *Vitis.* 37(2):73-78.
- Ollat N., Lafontaine M., 2003. Short and long term effects of three rootstocks on cabernet sauvignon vine behaviour and wine quality. *Acta Horticulturae.* 617:95-99.
- Ollat N., Tandonnet J.P., Bordenave L., Decroocq S., Geny L., Gaudillere J.P., Fouquët R., Barrieu F., Hamdi S., 2003. La vigueur conférée par le porte-greffe : hypothèses et pistes de recherches. *Bulletin de l'OIV.* 76(869-70):581-595.
- Pandey R.M., Farmahan H.L., 1977. Changes in the rate of photosynthesis and respiration in leaves and berries of *Vitis vinifera* grapevines at various stages of berry development. *Vitis.* 16:106-117, cité par Champagnol F., 1984. Eléments de physiologie de la vigne et viticulture générale. *Champagnol F., Saint-Gely-du-Fesc, France.* 352pp.
- Patakas A., Noitsakis B., 1999. An indirect method of estimating leaf area index in cordon trained spur pruned grapevines. *Scientia Horticulturae.* 80:299-305.
- Payan J.C., Salançon E., 2004. Comportement de la vigne face à la canicule et la sécheresse de 2003. *Les entretiens viti-vinicoles Rhône-Méditerranée.* 3-6pp.
- Payan J.C., Garcia de Cortázar Aauri I., Brisson N., de Munter I., 2005 Assimilation des caractéristiques du système sol-racines par simulation du potentiel de base en parcelle viticole. *Séminaire STICS, Carry-le-Rouet (mars 2005).* 58-62pp.
- Pellegrino A., 2003. Elaboration d'un outil de diagnostic du stress hydrique utilisable sur la vigne en parcelle par couplage d'un modèle de bilan hydrique et d'indicateurs de fonctionnement de la plante. *Thèse pour l'obtention du Diplôme de Doctorat spécialité Sciences Agronomiques.* 138pp.
- Pellegrino A., Lebon E., Voltz M., Wery J., 2004. Relationships between plant and soil water status in vine (*Vitis vinifera* L.). *Plant and Soil.* 266:129-142.
- Perarnaud V., Seguin B., Malezieux E., Deque M., Loutau D., 2005. Agrometeorological research and applications needed to prepare agriculture and forestry to 21st Century Climate Change. *Climatic change.* 70:319-340.
- Perotto O., 2005. Analyse des conditions d'établissement du feuillage et de la compétition inter-cep dans le modèle de culture STICS-vigne. *Mémoire de fin d'études ENITA-Bordeaux.* 50pp.
- Pieri P., Fermaud M., 2005. Effects of defoliation on temperature and wetness of grapevine berries. *Acta Horticulturae.* 689: 09-116.
- Planton S., 2003. A l'échelle des continents : le regard des modèles. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris.* 335(6-7):535-543.
- Poni S., Intriери C., Silvestroni O., 1994. Interactions of leaf age, fruiting, and exogenous cytokinins in Sangiovese grapevines under non-irrigated conditions. I. Gas exchange *Amer. J. Enol Vitic.* 45:71-78

- Pouget R., 1963. Recherches physiologiques sur le repos végétatif de la vigne (*Vitis vinifera* L.) : la dormance des bourgeons et le mécanisme de sa disparition. Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'Université de Bordeaux. 247pp.
- Pouget R., 1968. Nouvelle conception du seuil de croissance chez la vigne. *Vitis*. 7:201-205.
- Pouget R., 1972. Considérations générales sur le rythme végétatif et la dormance des bourgeons de la vigne. *Vitis*. 11:198-217.
- Pouget R., 1988. Le débourrement des bourgeons de la vigne : méthode de prévision et principes d'établissement d'une échelle de précocité de débourrement. *Conn. Vigne-Vin..*, 22(2):105-123.
- Rawls W.J., Brakensiek D.L., 1989. Estimation of soil water retention and hydraulic properties. In: Morel, S. (Ed.), *Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling. Theory and Practice*. Kluwer academic publishers. 275-300pp, cité dans Acutis M., Donatelli M., 2003. SOILPAR 2.00: software to estimate soil hydrological parameters and functions. *Eur. Agron J.* 18:373-377.
- Richardson E.A., Seeley S.D., Walker D.R., 1974. A model for estimating the completion of rest for Redhaven and Elberta peach trees. *HortSci.* 9(4):331-332.
- Riou C., Valancogne C., Pieri P., 1988. A simple model of interception of solar radiation by a vineyard - experimental verification. *Agronomie*. 9:441-450.
- Riou C., 1994. The effect of climate on grape ripening : application to the zoning of sugar content in the European community. *CECA-CEE-CECA. Luxembourg*. 321pp
- Riou C., Lebon E., 2000. Application d'un modèle de bilan hydrique et de la mesure de la température de couvert au diagnostic du stress hydrique de la vigne à la parcelle. *Bulletin de l' O.I.V.*. 837-838:756-764.
- Ripoche D., Weiss M., Prevot L., 2001. Driving the STICS application to remote sensing. *Proceedings of 2nd International Symposium on Modelling Cropping System, Italy*. 169-170pp.
- Rivera C.E., Devoto L., 2003. Desarrollo Fenológico de 20 clones de *Vitis vinifera* L. Bloque Fundación Vivero AgroUC, Pirque. *Mémoire de Fin d'Etudes Ingénieur Agronome de l'Université Catholique du Chili*. 72pp.
- Rodriguez-Lovelle B., 2003. Guide de la fertilisation raisonnée. Vignobles de la Vallée du Rhône. Ed. Institut Rhodanien. Orange. 21pp.
- Ruget F., Brisson N., Delecolle R., Faivre R., 2002. Sensitivity analysis of a crop simulation (STICS) in order to determine accuracy needed for parameters. *Agronomie*. 22:133-158.
- Salinari F., Giosuè S., Tubiello F.N., Rettori A., Rossi V., Spanna F., Rosenzweig C., Gullino M.L., 2006. Downy mildew (*Plasmopara viticola*) epidemics on grapevine under climate change. *Global Change Biology*. 12(7):1299-1307.
- Salinger J.M., 2005. Climate variability and change : past, present and future – an overview. *Climate change*. 70:9-29.
- Sánchez-de-Miguel P., Centeno A., Baeza P., Lissarrague J.R., 2004. Photosynthetic response to light of "Tempranillo" leaves in the field: effects of leaf age, position and water potential. *Acta Horticulturae*. 689:357-364
- Sarvas R., 1974. Investigations on the annual cycle of development of forest trees. II. Autumn dormancy and winter dormancy. *Commun. Inst. For. Fenn.* 84:1-101.
- Scholander P.F., Hammel H.T., Bradstreet E.D., Hemmingsen E.A., 1965 Sap pressure in vascular plants. *Science* 148:339-346.
- Schultz H.R., Matthews M., 1988. Resistance to water transport in shoots of *Vitis vinifera* L. *Plant Physiology*. 88:718-724.
- Schultz H.R., 1995. Grape canopy structure, light microclimate and photosynthesis. 1. A two-dimensional model of the spatial distribution of surface area densities and leaf ages in two canopy systems. *Vitis*. 34(4):211-215.

- Schultz H.R., 2000. Climate change and viticulture: a European perspective on climatology, carbon dioxide and UV-B effects. *Aust. J. Grape Wine Res.* 6:1-12.
- Schultz H.R., Lebon E., 2005. Modelling the effect of climate change on grapevine water relations. *Acta Horticulturae.* 689:71-78.
- Seguin B., Baculat B., Baret F., Brisson N., Huard F., Ruget F., 2004. An overview of the consequences of the summer 2003 for agriculture in France. *VIII ESA congress: European agriculture in a global context. Copenhagen.* 11-15pp.
- Seguin B., Garcia de Cortázar Atauri I., 2004. Climate warning : consequences for viticulture and the notion of “terroirs” in Europe. *Acta Horticulturae.*
- Seguin B., Brisson N., Loustou D., Dupoey J.L., 2005. Impact du changement climatique sur l’agriculture et la forêt. Dans « L’homme face au climat ». *Actes du symposium du Collège de France.* Paris. 177-203pp.
- Seguin B., 2006. Le réchauffement récent attesté par les impacts observe sur les écosystèmes. *Actes du XIX^{ème} Colloque de l’Association Internationale de Climatologie.* 27-33pp.
- Sellers W.D., 1965. Physical Climatology. *University of Chicago Press, Chicago, IL.* 272pp.
- Semenov M.A., Brooks R.J., Barrow E.M., Richardson C.W., 1998. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. *Climate Research.* 10:95-107.
- Sene K.J., 1994. Parameterisations for energy transfers from a sparse vine crop. *Agricultural and forest meteorology.* 71:1-18.
- Sepulveda G.R., Kliewer W.M., 1983. Estimation of leaf area of two grapevines cultivars (*Vitis vinifera* L.) using laminae linear measurements and fresh weight. *Amer. J. Enol Vitic.* 34:221-226.
- Shaultout A.D., Unrath C.R., 1983. Rest completion prediction model for Starkrimson Delicious apples. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 108(6): 957-961.
- Singels A., de Jager J.M., 1991. Refinement and validation of the PUTU wheat crop growth model 2 Leaf area expansion . *South African Journal of Plant and Soil.* 8:67-72.
- Singleton V.L., Ough C.S., Nelson K.E., 1966. Density Separations of Wine Grape Berries and Ripeness Distribution. *Amer. J. Enol Vitic.* 17:95-105.
- Sinoquet H., Bonhomme R., 1992. Modeling radiative transfer in mixed and row intercropping systems. *Agricultural and forest meteorology* 62(3-4):219-240.
- Smart R.E., 1973. Sunlight interception by vineyards. *Amer. J. Enol Vitic.* 24:141-147.
- Sooroshian S., Gupta V.K., 1993. Model calibration. In: Singh V.P. (ed.), Computer Models of Watershed Hydrology. *Water Ressources Publication,* 1130.
- Sort X., 2006. Effect of global climate change on catalan viticulture. *Ier Encuentro Mundial sobre Calentamiento Global y Vino. Barcelona.* 17pp
- Staudt G., Schneider W., Leidel J., 1986. Phases of Berry Growth in *Vitis vinifera*. *Annals of Botany.* 58:789-800.
- Stevenson T., 2001. New Sothebys Wine Encyclopedia: A Comprehensive Reference Guide to the Wines of the World, Dorling Kindersley, London, 3rd Edition. Citée dans Jones G.V., White M.A., Cooper O.R., Storchmann K., 2005a. Climate Change and Global Wine Quality. *Climatic Change.* 73(3):319-343.
- Stock M., Gerstngarbe F.W., Kartschall T., Werner P.C., 2005. Reliability of Climate change impact assessments for viticulture. *Acta Horticulturae.* 689:29-39.
- Stockle C.O., Williams J.R., Rosenberg C.A., Jones C.A., 1992. A method for estimating direct and climatic effects of rising atmospheric carbon dioxide on growth and yield crops. *Agricultural Systems.* 38pp.
- Stoev K., Slavtcheva T., 1982. La photosynthèse nette chez la vigne (*Vitis vinifera* L.) et les facteurs écologiques. *Connaiss. Vigne. Vin.* 3:171-185.

- Subak S., Lister D.H., 1999. Warm-weather crops: grapes. Indicators of climate change in the UK. *Centre of Ecology and Hydrology*. 87pp.
- Tarara J.M., Ferguson J.C., Hoheisel G.A., Perez Peña J.E., 2005. Asymmetrical canopy architecture due to prevailing wind direction and row orientation creates an imbalance in irradiance at the fruiting zone of grapevines. *Agricultural and Forest Meteorology*. 135:144-155.
- Tisseyre B., 2005. Viticulture de précision: variabilité spatiale et stabilité temporelle des paramètres quantitatifs et qualitatifs à un niveau intra-parcellaire. *Proceedings of 4th Gesco. Vol I. Germany*. 19-28pp.
- Thiébeau P., Herre C., Doledec A.F., Perraud A., Panigai L., Mary B., Nicolardot B., 2005. Incidence du mode de couverture du sol sur la fourniture en azote des sols de vigne en Champagne. *J. Int. Sci. Vigne Vin*. 39:163-177.
- Tonietto J., 1999. Les microclimats viticoles mondiaux et l'influence du mésoclimat sur la typicité de la Syrah et du Muscat de Hambourg dans le sud de la France. *Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Institut national Agronomique Montpellier*.
- Tonietto J., Carbonneau A., 1999. Facteurs mésoclimatiques de la typicité du raisin de table de l'A.O.C. Muscat du Ventoux dans le département de Vaucluse, France. *Prog. agric. vitic.* 115(12) :271-279.
- Torokfalby E.; Kriedemann P., 1977. In Vine leaf photosynthesis. *C.R. Symp. Intern. Sur la qualité de la vendange. Capetown*. 86pp.
- Tregoat O., Ollat N., Grenier G., Van Leeuwen C., 2001, Etude comparative de la précision et de la rapidité de mise en oeuvre de différentes méthodes d'estimation de la surface foliaire de la vigne. *J. Int. Sci. Vigne Vin*. 35(1):31-39.
- Van Leeuwen C., Gaudillere J.P., Tregoat O., 2001. L'évaluation du régime hydrique de la vigne à partir du rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$. *J. Int. Sci. Vigne Vin*. 35:195-205
- Van Zyl J.L., 1983. Influence de l'irrigation sur la croissance et la qualité des vignes et raisins de colombar. XVIII congrès international de la vigne et du vin de l'OIV. Le Cap, Afrique du Sud. 223-247pp, cité dans Champagnol F., 1984. Eléments de physiologie de la vigne et viticulture générale. *Champagnol F., Saint-Gely-du-Fesc, France*. 352pp.
- Walker R.R., Zhang X., Godwin D.C., 2005. Vinologic growth and development simulation model - rootstock and salinity effects on vine performance. *Proceedings of GESCO. Vol. 2. August 2005 Geisenheim, Vol. 2*. 443-448pp.
- Wallach D., Goffinet B., 1987. Mean squared error of prediction in models for studying ecological and agronomics systems. *Biometrics*. 43:561-573.
- Wallach D., Goffinet B., Bergez J.E., Debaeke P., Leenhardt D., Aubertot J.N., 2001. Parameter estimation for crop models: a new approach and application to a corn model. *Agron. J.* 93:757-766.
- Wallach D., 2006. Evaluating crop models. In: Working with dynamic crop models. Evaluating, analyzing, parameterizing and using them. *In Wallach D., Makowski D., Jones J.W. (Editors), Elsevier Science, in press*. 6-37pp.
- Weiss M., Baret F., Smith G.J., Jonckheere I., Coppin P., 2003. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination: Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology*. 121(1-2):37-53.
- Wermelinger B., Koblet W., 1990. Seasonal growth and nitrogen distribution in grapevine leaves, shoots and grapes. *Vitis*. 29:15-26.
- Wermelinger B., Baumgärtner J., Gutierrez A.P., 1991. A demographic model of assimilation and allocation of carbon and nitrogen in grapevines. *Ecological modelling*. 53:1-26.
- White M.A., Diffenbaugh N.S., Jones G.V., Pal J.S., Giorgi F., 2006. "Extreme heat reduces and shifts United States premium wine production in the 21st century". *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 103(30):11217-11222.

- Williams D.W., Williams L.E., Barnett W.W., Kelley K.M., Mckenry M.V., 1985a. Validation of a Model for the Growth and Development of the Thompson Seedless Grapevine. I. Vegetative Growth and Fruit Yield. *Amer. J. Enol Vitic.* 36:275-282.
- Williams D.W., Andris H.L., Beede R.H., Luvisi D.A., Norton M.V.K., Williams L.E., 1985b. Validation of a model for the growth and development of the Thompson Seedless grapevine. II. Phenology. *Amer. J. Enol Vitic.* 36:283-289.
- Williams L.E.B., Biscay P.J., 1991. Partitioning of dry weight, nitrogen, and potassium in cabernet Sauvignon grapevines from anthesis until harvest. *Amer. J. Enol Vitic.* 42:113-117.
- Williams L.E., 1996. Grape. In: E. a. S. Zamski, A (ed.) *Photoassimilate Distribution in Plants and Crops.* Marcel Dekker, Inc., New York. 928pp
- Williams III L., Martinson TE., 2003. Nondestructive leaf area estimation of Niagara and DeChaunac grapevines. *Scientia horticulturae.* 98:493-498.
- Winkel T., Rambal S., 1990. Stomatal conductance of some grapevines growing in the field under a Mediterranean environment. *Agricultural and forest meteorology* 51:107-121.
- Winkler A.J., Williams W.O., 1945. Starch and Sugars of *Vitis vinifera*. *Plant Physiology.* 20:412-432.
- Winkler A.J., Cook J.A., Kliewer W.M., Lider L.A., 1962. General Viticulture. *University of California Press, Berkeley and Los Angeles, California.* 692pp.
- Yuste J., Gutierrez I., Rubio J.A., Albuquerque M.V., 2004. Réponse des potentiels hydriques de la feuille et du xylème comme indicateurs de l'état hydrique de la vigne, cépage Tempranillo, soumis à différents régimes hydriques dans la vallée du Douro. *J. Int. Sci. Vigne Vin.* 38(1):21-26.
- Zapata C., 1998. Suivi pluriannuel de la mise en place et de la mobilisation des réserves carbonées et azotées chez 2 cépages de vigne présentant une sensibilité à la coulure.- *Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris.*
- Zapata C., Deléens E., Chaillou S., Magné C., 2004. Partitioning and mobilization of starch and N reserves in grapevine (*Vitis vinifera* L.). *Journal of Plant Physiology.* 161(9):1031-1040.

Annexe I

Tableau 1. Caractéristiques générales des parcelles utilisées dans la Base de Données Ecophysiologiques.

Vignoble	Code Parcelle	Organisme	Conduite	Cépage	Porte Greffe	Années	Position Parcelle	Orientation	Densité (ceps/m ²)	Inter-rang (m)
Côtes du Rhône	PioGr	GDA - CA84	Cordon Royat	Grenache	Fercal	2004-2005	44°10' - 4°08'	Nord	0.44	2.25
	PioSy	GDA - CA84	Cordon Royat	Syrah	161 - 49C	2004-2005	44°10' - 4°08'	Nord	0.44	2.25
	SerSc	GDA - CA84	Cordon Royat	Grenache	R 110	2003	44°4' - 5°3'	Nord - Est	0.36	2.25
	SerGr	GDA - CA84	Cordon Royat	Grenache	R 110	2004-2005	44°4' - 5°3'	Nord - Est	0.36	2.25
	SerSy	GDA - CA84	Cordon Royat	Syrah	RU 140	2004-2005	44°4' - 5°3'	Sud - Est	0.36	2.5
Bourgogne	MarPi	IUVV	Guyot Double	Chardonnay	SO4	2004-2005	47°16 - 4°59'	Est	1	1
	MarCy	IUVV	Guyot Double	Pinot Noir	SO4	2004-2005	47°16 - 4°59'	Est	1	1
	MbaPi	BNIC	Guyot Double	Pinot Noir	SO4	2004-2005	47°2' - 4°49'	Est	1	1
Champagne	FchPi	CIVC	Cordon Royat Simple	Pinot Noir	41B	2004-2005	49°2' - 3°57'	Est	0.83	1.2
	FchCy	CIVC	Cordon Royat Simple	Chardonnay	41B	2004-2005	49°2' - 3°57'	Est	0.83	1.2
	PluPi	CIVC	Chablis	Pinot Noir	41B	2004-2005	49°1' - 3°58'	Sud - Est	0.75	1.2
	PluCy	CIVC	Chablis	Chardonnay	41B	2004-2005	49°1' - 3°58'	Sud - Est	0.75	1.2
Val de Loire	MbChR	INRA - Angers	Guyot Simple	Chenin	Riparia	2004-2005	47°7' - 0°7'	Nord	0.5	2
	MbChS	INRA - Angers	Guyot Simple	Chenin	SO4	2004-2005	47°7' - 0°7'	Nord	0.5	2
	MbCfR	INRA - Angers	Guyot Simple	Cabernet Franc	Riparia	2004-2005	47°7' - 0°7'	Nord	0.5	2
	MbCfS	INRA - Angers	Guyot Simple	Cabernet Franc	SO4	2004-2005	47°7' - 0°7'	Nord	0.5	2
Cognac	SigUb	BNIC	Guyot Double	Ugni Blanc	RSB1	2004-2005	45°44 - 0°9'	Nord	0.3	3
	JuiUb	BNIC	Guyot Double	Ugni Blanc	Fercal	2004-2005	45°35' - 0°15'	Est	0.27	3
Bordeaux	Bgrmer	INRA - Bordeaux	Guyot Double	Merlot	Fercal	2004-2005	44°45' - 0°34'	Nord - Est	0.62	1.6
	Barmer	INRA - Bordeaux	Guyot Double	Merlot	Fercal	2004-2005	44°45' - 0°34'	Nord - Est	0.62	1.6
Languedoc	BolGr	ITV - Montpellier	Cordon Royat	Grenache	RU 140	2004-2005	43°47' - 4°24'	Nord - Est	0.39	2.25
	BolSy	ITV - Montpellier	Cordon Royat	Syrah	RU 140	2004-2005	43°47' - 4°24'	Nord - Est	0.39	2.25
	SauGr	ITV - Montpellier	Cordon Royat	Grenache	110R	2004-2005	43°50' - 3°50'	Est	0.38	2.35

Tableau 2. Mesures biophysiques réalisées dans les différentes parcelles de la Base de Données Ecophysiologiques.

Vignoble	Code Parcelle	Phénologie	LAI	MS - MF	Azote Plante	Rendement	Qualité	Autres
Cotes de Rhone	PioGr	Oui	Planimètre	Oui	Oui	Oui	TAVP, AT, Antho, Nassim	Potentiel de Base, Bilan Hydrique, Densimétrie
	PioSy	Oui	Planimètre	Oui	Oui	Oui	TAVP, AT, Antho, Nassim	Potentiel de Base, Bilan Hydrique, Densimétrie
	SerSc	Oui	Planimètre	Oui	2003	Oui	TAVP, AT, Antho, Nassim	Potentiel de Base, Bilan Hydrique, Densimétrie
	SerGr	Oui	Planimètre	Oui	Oui	Oui	TAVP, AT, Antho, Nassim	Potentiel de Base, Bilan Hydrique, Densimétrie
	SerSy	Oui	Planimètre	Oui	Oui	Oui	TAVP, AT, Antho (2004)	Potentiel de Base, Bilan Hydrique, Densimétrie
Bourgogne	MarPi	Oui	Traitement Image	Oui	2005	Oui	TAVP, AT	Potentiel de Base (2005), Densimétrie (2005)
	MarCy	Oui	Traitement Image	Oui	2005	Oui	TAVP, AT	Potentiel de Base (2005), Densimétrie (2005)
	MbaPi	Oui	Traitement Image	Oui	Non	Oui	TAVP, AT	Densimétrie (2005)
Champagne	FchPi	Oui	Traitement Image	Oui	Oui	2005	TAVP, AT, Ntot, Nassim	Teneur en eau du sol
	FchCy	Oui	Traitement Image	Oui	Oui	2005	TAVP, AT, Ntot, Nassim	Teneur en eau du sol
	PluPi	Oui	Traitement Image	Oui	Oui	2005	TAVP, AT, Ntot, Nassim	Teneur en eau du sol
	PluCy	Oui	Traitement Image	Oui	Oui	2005	TAVP, AT, Ntot, Nassim	Teneur en eau du sol
Val de Loire	MbChR	Oui	Traitement Image	Oui	Oui	Oui	TAVP, AT, Ntot (2004)	Teneur en eau du sol
	MbChS	Oui	Traitement Image	Oui	Oui	Oui	TAVP, AT, Ntot (2004)	Teneur en eau du sol
	MbCfR	Oui	Traitement Image	Oui	Oui	Oui	TAVP, AT, Antho, Ntot (2004)	Teneur en eau du sol
	MbCfS	Oui	Traitement Image	Oui	Oui	Oui	TAVP, AT, Antho, Ntot (2004)	Teneur en eau du sol
Cognac	SigUb	Oui	Traitement Image	Oui	Oui	Oui	TAVP, AT, Ntot	-
	JuiUb	Oui	Traitement Image	Oui	Oui	2005	TAVP, AT, Ntot	-
Bordeaux	Bgrmer	Oui	Traitement Image	Oui	Oui	Oui	TAVP, AT, Antho, Ntot (2004)	Teneur en eau du sol
	Barmer	Oui	Traitement Image	Oui	Oui	Oui	TAVP, AT, Antho, Ntot (2004)	Teneur en eau du sol
Languedoc	BolGr	Oui	Traitement Image	Oui	Oui	Oui	TAVP, AT, Antho, Nassim	Potentiel de Base, Densimétrie
	BolSy	Oui	Traitement Image	Oui	Oui	2004	TAVP, AT, Antho, Nassim	Potentiel de Base, Densimétrie
	SauGr	Oui (sauf stade 4 en 2004)	Traitement Image	Oui	Oui	Oui	TAVP, AT, Antho, Nassim	Potentiel de Base, Densimétrie

Tableau 3. Synthèse de l'origine des données Sol et Climat pour la Base de Données Ecophysiologiques.

Vignoble	Code parcelle	Obtention des caractéristiques hydrodynamiques du sol	Analyses du sol	Organisme qui a fourni les données Météo	Situation de la station météorologique par rapport à la parcelle
Côtes de Rhône	PioGr	Estimé SoilPar2	Tarière Analyses GDA	CIRAME	Dans la parcelle
	PioSy	Estimé SoilPar2	Tarière Analyse GDA	CIRAME	Dans la parcelle
	SerSc	Laboratoire	Fosse Pédologique	INRA	Dans la parcelle
	SerGr	Laboratoire	Fosse Pédologique	INRA	Dans la parcelle
	SerSy	Laboratoire	Fosse Pédologique	INRA	Dans la parcelle
Bourgogne	MarPi	Estimé SoilPar2	Fosse Pédologique	INRA	7.5 km
	MarCy	Estimé SoilPar2	Fosse Pédologique	INRA	7.5 km
	MbaPi	Estimé SoilPar2	Fosse Pédologique	INRA	31.5 km
Champagne	FchPi	Estimé SoilPar2	Tarière Analyse CIVC	CIVC	Dans la parcelle
	FchCy	Estimé SoilPar2	Tarière Analyse CIVC	CIVC	Dans la parcelle
	PluPi	Estimé SoilPar2	Tarière Analyse CIVC	CIVC	Dans la parcelle
	PluCy	Estimé SoilPar2	Tarière Analyse CIVC	CIVC	Dans la parcelle
Val de Loire	MbChR	Estimé SoilPar2	Tarière Analyse INRA	INRA	Dans la parcelle
	MbChS	Estimé SoilPar2	Tarière Analyse INRA	INRA	Dans la parcelle
	MbCfR	Laboratoire	Fosse Pédologique	INRA	Dans la parcelle
	MbCfS	Laboratoire	Fosse Pédologique	INRA	Dans la parcelle
Cognac	SigUb	Laboratoire	Fosse Pédologique	Météo France	14 km
	JuiUb	Laboratoire	Fosse Pédologique	Météo France	12.5 km
Bordeaux	Bgrmer	Estimé SoilPar2	Tarière Analyse INRA	INRA	Dans la parcelle
	Barmer	Estimé SoilPar2	Tarière Analyse INRA	INRA	Dans la parcelle
Languedoc	BolGr	Laboratoire	Fosse Pédologique	INRA	11 km
	BolSy	Laboratoire	Fosse Pédologique	INRA	11 km
	SauGr	Laboratoire	Fosse Pédologique	ITV	Dans la parcelle

Tableau 4. Synthèse des parcelles par organisme pour créer la Base de Données Historiques. Les données entre parenthèses signifient qu'il manque quelques données.

RÉGION	ORGANISMES	Unités de Simulation	Types de Sols	Cépages	Années d'expérimentation	Type d'expérimentation
Côtes du Rhône	Syndicat Général des Vignerons Réunis des Côtes Du Rhône	48	1	Grenache et Syrah	1997 - 2003	Essaie Conduite
	Groupe de Développement Agricole - Viticulture CA84	14 (28)	3 (5)	Grenache et Syrah	1997 – 2002 (2003)	Observatoire Grenache, Essais Fertilisation, Essais Conduite
Bourgogne	BIVB	(7)	(1)	Pinot Noir	(1998 – 2003)	Parcelle Control BIVB
Champagne	CIVC	32	3	Pinot Noir et Chardonnay	1998 - 2003	Réseau Terroir CIVC (Doledec <i>et al.</i> , 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003; Delpuech <i>et al.</i> , 2004; Le Sueur <i>et al.</i> , 2005)
Val de Loire	Unité Expérimental de la Vigne INRA-Angers	117	23	Cabernet Franc et Chenin	1992 - 2003	Réseau Terroir (Morlat, 1989), Réseau Coteaux du Layon (Barbeau <i>et al.</i> , 1998)
	Inter-Loire	41	11	Cabernet Franc	2002 - 2005	Réseau Cabernet Franc
Cognac	BNIC	64	21	Ugni Blanc	2001 - 2004	Parcelles Control Cognac
Bordeaux	ITV	28 (40)	2 (3)	Merlot (Cabernet Sauvignon)	2000 - 2003	Réseau Qualité ITV - Bordeaux
Languedoc	ITV	3	1	Grenache et Syrah	2002 - 2003	Parcelles Expérimentales
Total		347 (381)	65 (69)			

Tableau 5. Synthèse des données demandées pour créer la Base de Données Historiques.

A.- Données Description de la Parcelle	
A1.-	Le cépage (clone)
A2.-	Le porte-greffe
A3.-	La densité de plantation (inter-rang, écartement des ceps)
A4.-	Type de conduite
A5.-	Orientation des rangs : N-S, E-O...
A6.-	Potential qualitatif des parcelles : Très bon, bon, moyen, faible.
A7.-	Potential qualitatif du millésime : Très bon, bon, moyen, faible.
A8.-	Structure: Hauteur de la base du feuillage, Hauteur et largeur maximale du feuillage
A9.-	Porosité de la végétation
B.- Données Itinéraire Technique	
B1.-	Apports d'engrais minéral (type, quantité et jour d'apport)
B2.-	Apports de engrais organique (type, quantité et jour d'apport)
B3.-	Dates et profondeur de travail du sol (cm)
B4.-	Effeuillage (jour et position)
B5.-	Jour de Taille et traitement du bois de taille
B6.-	Rognage : jour, hauteur (cm) et largeur (cm) de gabarit après rognage.
B7.-	Eclaircissage (nombre de grappes avant et après)
B8.-	Critère de récolte: Indice Acidité/Sucre ou Botrytis
C.- Données Sol	
C1.-	Texture ou granulométrie
C2.-	CaCO ₃ (%)
C4.-	Profondeur de chaque horizon (cm)
C5.-	Profondeur maximale estimée(cm)
C6.-	Densité apparente (g/cm ³)

D.- Données Climat	
D1.-	Nom de la station et latitude en degrés
D2.-	Température minimale (°C)
D3.-	Température maximale (°C)
D4.-	Pluviométrie (mm)
D5.-	Rayonnement Global (MJ/m ² /jour)
D6.-	Humidité de l'air (%)
D7.-	Vent (m/s)
E.- Observations	
E1.-	Phénologie: débourrement, floraison et véraison
E2.-	Date de la récolte
E3.-	Rendement
E4.-	Poids de 200 ou 1000 baies
E5.-	Nombre de grappes à la récolte
E6.-	Poids de Bois de taille (t/ha)
F. Autres Données supplémentaires	
F1.-	Valeurs de LAI, Biomasse sèche (en dynamique)
F2.-	Teneur en eau du sol, valeurs de Potentiel de Base (en dynamique)
F3.-	Teneur en eau azoté du sol (en dynamique)
F4.-	Description du profil racinaire
F5.-	Fertilité
F6.-	Sucre (g/l)
F7.-	Acidité Total (g H ₂ SO ₄ /l)
F8.-	Anthocyanes (g/kg) et Méthode
F9.-	Azote dans les moûts (mg/l)
F10.-	Autres données qualitatives

Tableau 6. Valeurs de biomasse de réserves carbonés et azotés du cep (kg/cep), pour différents types de taille, à partir des hypothèses suivantes: la masse des troncs et des racines est constituée respectivement de 20 et 25% de réserves, la masse de racines à 66% de la masse du tronc, et la densité moyenne du bois de 0.5gr/cm³. Par rapport la concentration d'azoté, elle est de considérée de 0.55% (± 0.09) pour le tronc, et 1% pour les racines (Bates et *al.*, 2002).

Réserves carbonées				
	Hauteur du tronc (cm)	Réserves tronc (kg/cep)	Réserves racines (kg/cep)	Réserves total (kg/cep)
cordon double	60	0.4569	0.3807	0.8376
cordon simple	60	0.4192	0.3493	0.7685
guyot	30	0.1955	0.1629	0.3584
	40	0.2638	0.2198	0.4836
	60	0.3925	0.3271	0.7196
	70	0.4577	0.3814	0.8390
chablis	30	0.3465	0.2888	0.6353

Réserves azotées				
	Hauteur du tronc (cm)	Réserves tronc (kg/cep)	Réserves racines (kg/cep)	Réserves total (kg/cep)
cordon double	60	0.0126	0.0152	0.0126
cordon simple	60	0.0115	0.0140	0.0115
guyot	30	0.0054	0.0065	0.0054
	40	0.0073	0.0088	0.0073
	60	0.0108	0.0131	0.0108
	70	0.0126	0.0153	0.0126
chablis	30	0.0095	0.0116	0.0095

Annexe II

Types de conduite et échantillonnage

Dans l'expérimentation réalisée dans le cadre de l'adaptation du modèle STICS à la vigne, le seul critère en terme de structure du feuillage était de travailler sur des plantations de vigne palissé. En raison du formalisme du modèle qui était adapté à des structures géométriques de la densité du feuillage (module transfert radiatif) (Brisson et al, 2002) du type triangle ou carré. Nous présentons ici un résumé du document « Protocole de la Base de Données Ecophysiologiques », dans lequel nous avons décrit les différents types de mesures biophysiques nécessaires pour le paramétrage du modèle. Les différents types de conduites rencontrés dans les parcelles du réseau BDE sont décrits ci-après et nous proposons une explication graphique des méthodes d'échantillonnage selon le type de taille proposé.

Cordon Double

Dans la taille en cordon de Royat, la souche a une charpente ou tronc assez long et les bras sont horizontaux, normalement alignés sur un fil de fer. Ce système de taille est intéressant pour les cépages productifs.

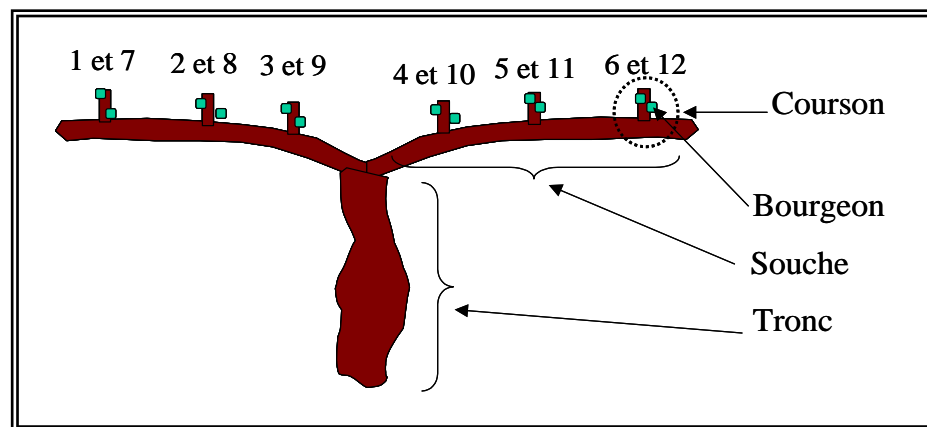


Figure 1 : structure de taille en Cordon Royat avec six coursons à deux bourgeons.

Ce protocole est adapté pour les parcelles de Côtes du Rhône Méridionales et du Languedoc et seulement dans les cas de 6 coursons par cep.

Dans ce type de conduite l'objectif est de récupérer 18 coursons (équivalent à trois ceps de 6 coursons), normalement avec deux bourgeons chacun. Pour observer si la répartition de la biomasse et de la surface foliaire est la même dans tout le cep, nous avons échantillonné deux coursons sur chaque cep (Figure 1). Pour réaliser cette opération, nous enlevons les deux rameaux, mais chacun d'un courson différent. De cette façon, nous assurons un bourgeon productif pour l'année prochaine (voir image Figure 2).

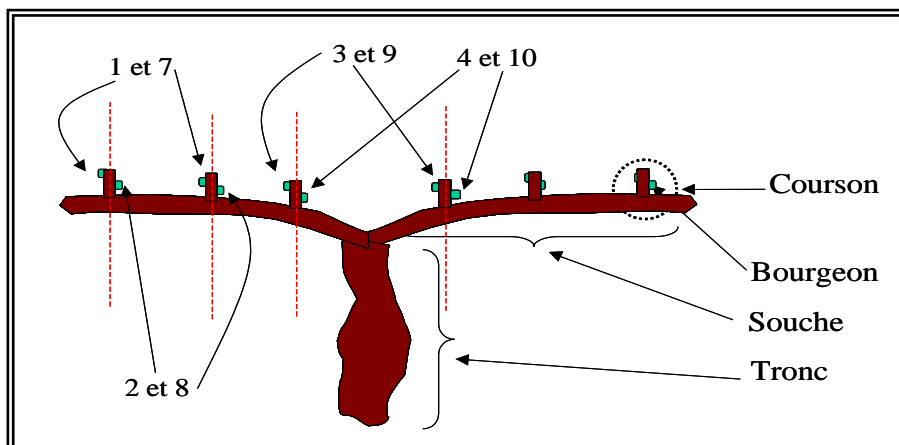


Figure 2 : représentation d'échantillonnage sur un cep avec taille en Cordon Royat.

Pour ne pas avoir de problèmes de compensation dans les ceps, nous avons besoin d'une parcelle avec au minimum 150 ceps. Ainsi, on ne répète pas l'échantillonnage deux fois sur le même cep, pendant les deux années prévues pour l'expérimentation.

La mesure de poids de bois de taille, on la réalise sur des ceps qui n'ont pas été prélevés pendant l'année en cours.

Cordon simple

Ce protocole est adapté pour les parcelles de Champagne. Pour la taille en cordon simple, nous allons procéder de la façon suivante :

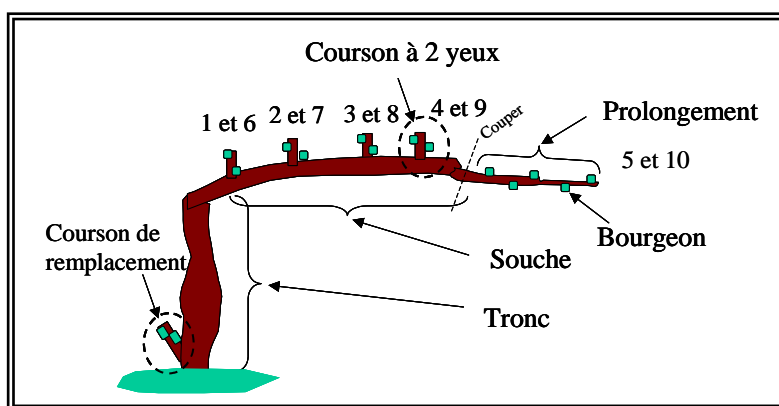


Figure 3 : structure de taille sur un cep avec taille en Cordon Simple Champenois.

Les coursons sont espacés de 15 centimètres au minimum et taillés à deux bourgeons (yeux dans la Figure 3) pour le Pinot Noir et trois pour le Chardonnay. Le prolongement est taillé à quatre bourgeons pour le Pinot Noir et cinq pour le Chardonnay (Figure 3).

Nous avons aussi un courson de remplacement à la base du cordon qui sert au rajeunissement progressif. Nous avons décidé de ne pas utiliser ce courson car nous avons la possibilité de travailler sur suffisamment de ceps qui n'ont pas ce courson. Selon la réglementation de taille en Champagne nous ne pouvons pas faire un rajeunissement de plus du 20 %. Nous prenons en compte que la production de bois reste réduite par rapport au total de la parcelle. Par contre, ce courson n'est pas dédié à la production des fruits, car il est ébourgeonné et le seul objectif est de produire une souche de remplacement pour le rajeunissement du cep.

Pour réaliser notre échantillonnage, on récupère tous les rameaux des coursons laissés sur la souche principale (selon la moyenne de coursons laissés sur la souche de la parcelle). On récupère aussi tous les rameaux laissés sur le prolongement de la souche (normalement quatre ou cinq, selon le cépage) comme un seul échantillon (coupé selon la Figure 3). Cette opération, nous allons la réaliser jusqu'à obtenir l'équivalent de trois ceps. Pour réaliser cette opération, nous enlevons les deux rameaux, mais chacun d'un courson différent, de la même façon montrée pour le Cordon Royat (Figure 4).

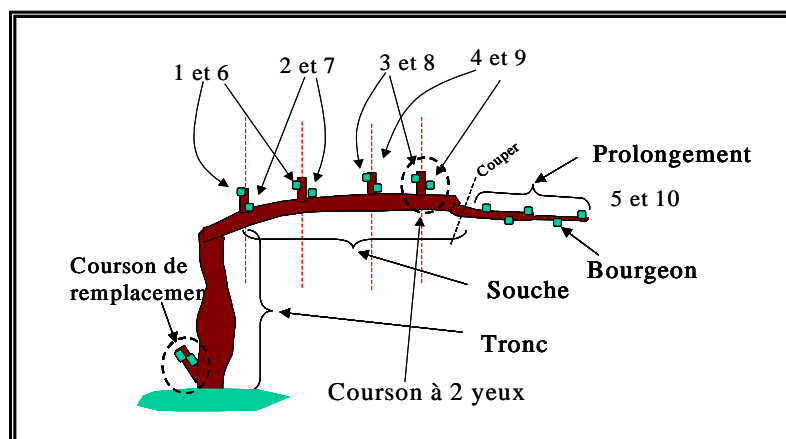


Figure 4 : représentation d'échantillonnage sur un cep avec taille en Cordon Simple Champenois.

Guyot Simple

La taille en Guyot est la plus fréquente sur l'ensemble du territoire. Ce protocole est adapté pour les parcelles de la Vallée de la Loire, de Bourgogne et pour certaines parcelles du Bordelais.

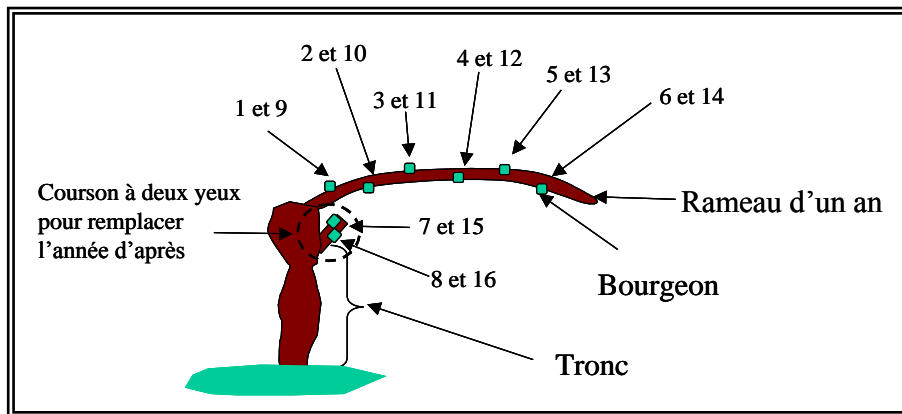


Figure 5 : structure de taille Guyot Simple.

La charge en bourgeons laissée à la taille dans ces deux régions est de six bourgeons sur le rameau d'un an et deux sur les coursons de remplacement. Ce dernier sert au rajeunissement annuel et nous le prenons en compte car les rameaux sont productifs (contrairement à la taille de cordon simple de Champagne). L'échantillonnage se fait en récupérant un rameau par cep. Cette opération, nous allons la réaliser jusqu'à obtenir l'équivalent à trois ceps.

Guyot Double

Ce protocole est adapté pour les parcelles de Cognac et pour les parcelles du Bordeaux, avec quelques différences par rapport au nombre de bourgeons laissés à la taille. C'est un type de taille dans laquelle nous laissons deux rameaux d'un an. La charge moyenne par cep dépend de chaque région est elle composé des bourgeons laissés dans les rameaux d'un an, plus les bourgeons laissés dans les coursons de remplacement (normalement deux bourgeons dans chaque courson). A l'égale que dans la taille guyot simple, ces bourgeons sont pris en compte, car ils sont considérés comme des rameaux productifs (Figure 6). Comme dans les autres cas, l'échantillonnage va se répéter jusqu'à obtenir l'équivalent à trois pieds de vigne.

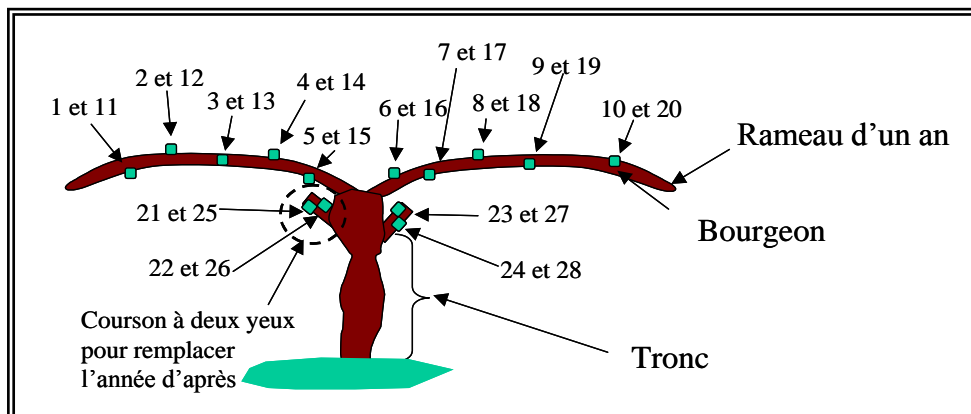


Figure 6 : structure de taille Guyot Double

Chablis

La taille Chablis est une taille courte, seulement pratiqué dans le vignoble de Champagne.

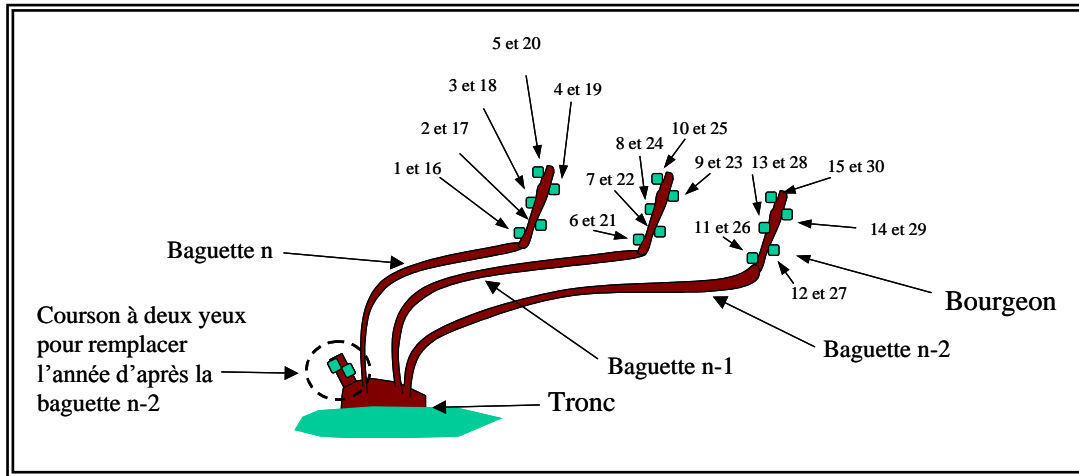


Figure 7 : structure de la taille en Chablis.

La structure du chablis comprend normalement 3 charpentes. Chacune des charpentes porte un prolongement à fruits à son extrémité. Un courson de remplacement avec deux bourgeons, est laissé à la base de la souche, ou un courson de rajeunissement de deux yeux francs sur une des charpentes. Dans notre cas nous allons avoir trois charpentes. Sur un cep nous allons avoir : une charpente de trois ans, une charpente de deux ans et une charpente d'une année. Ainsi, tous les trois ans, la charpente la plus vieille est taillé et remplacé par le rameau d'un an, qui a poussé à partir du courson de remplacement. Pour obtenir l'équivalent à trois ceps, nous allons récupérer les rameaux du courson de remplacement, ainsi que les rameaux des prolongements des différentes charpentes. Pour n'est pas endommager le cep, nous allons récupérer un prolongement de charpente par cep (Figure 7).

6.1.1. Commentaires

Nous avons défini des blocs le plus homogènes possibles dans chaque parcelle, à l'aide des différents responsables techniques. Un critère retenu pour déterminer la taille du bloc était de pouvoir disposer du plus grand nombre de ceps, de façon à ne pas répéter un échantillonnage deux fois sur le même cep. Dans tous les cas, l'objectif était de récupérer l'équivalent en nombre de coursons, rameaux ou prolongements (selon le type de taille) à trois ceps, en faisant un échantillonnage aléatoire sur tout le bloc. Chaque échantillon était ensuite décomposé en différentes parties: rameaux, feuilles et grappes (voir chapitre III). Le nombre de rameaux et des grappes étaient comptabilisés. Nous avons mesuré sur chaque partie de chaque échantillon le poids frais, le poids sec, la surface foliaire des feuilles, et la quantité d'azote de chaque partie.

Le travail nécessaire pour réaliser ce type d'expérimentation est très lourd en termes de volume d'échantillons, de main d'œuvre et de temps.

Le structure de la parcelle et son homogénéité sont deux caractéristiques fondamentales pour l'obtention des jeux des données de qualité. Pour cela, une bonne connaissance de la parcelle et des possibles zones sensibles présentes dans la même s'impose.

Finalement, les différents méthodes d'échantillonnage sont adaptés spécifiquement aux parcelles présentes dans le Réseau STICS-Vigne (2004-2005). Toute application sur d'autres parcelles avec le même type de taille nécessite d'un travail d'adaptation au nombre de bourgeons à la taille.

Annexe III

Tableau 1 . Description des paramètres qui définissent les températures cardinales.

Module	Paramètres	Origine du paramètre	Signification du paramètre	Unités	Paramètre dépendant de	Valeur
Développement	<i>TDMIN</i>	Bibliographie	Température seuil minimale pour le développement	°C	Espèce	10
	<i>TDMAX</i>	Bibliographie & BDE	Température seuil maximale pour le développement	°C	Espèce	37
	<i>TMINDEB</i>	Estimation modèle BRIN	Température minimale pour le calcul de la date de débourrement option somme de temp. Horaires	°C	Espèce	5
	<i>TMAXDEB</i>	Estimation modèle BRIN	Température minimale pour le calcul de la date de débourrement option somme de temp. Horaires	°C	Espèce	25
Feuillage	<i>TCMIN</i>	Bibliographie	Température minimale de croissance	°C	Espèce	10
	<i>TCMAX</i>	Bibliographie & BDE	Température maximale de croissance	°C	Espèce	37
Racines	<i>TGMIN</i>	Bibliographie	Température seuil minimale de la croissance racinaire	°C	Espèce	10
Croissance	<i>TEMIN</i>	Bibliographie	Température seuil minimale pour la croissance en biomasse	°C	Espèce	10
	<i>TEMAX</i>	Bibliographie & BDE	Température seuil maximale pour la croissance en biomasse	°C	Espèce	37
	<i>TEOPT</i>	Bibliographie	Température optimale pour la croissance en biomasse	°C	Espèce	25
Rendement	<i>TMINREMP</i>	Bibliographie & BDE	Température minimale pour le remplissage des grains	°C	Espèce	0
	<i>TMAXREMP</i>	Bibliographie & BDE	Température maximale pour le remplissage des grains	°C	Espèce	37

Tableau 2. Description des différents paramètres qui définissent le développement.

Module	Paramètres	Origine du paramètre	Signification du paramètre	Unités	Paramètre dépendant de	Valeur
DÉVELOPPEMENT	<i>Q10</i>	Estimation modèle BRIN	Q10 servant au calcul de dormance de Bidabe	SD	Espèce	Tableau 13
	<i>IDEBDORM</i>	Estimation modèle BRIN	Date d'entrée en dormance	jour	Espèce	Tableau 13
	<i>JVC</i>	Estimation modèle BRIN	Parcours de développement entre l'entrée en dormance et la sortie de dormance. Modèle de bidabe	Actions Froides (Q10)	Variété	Tableau 13
	<i>STDORDEBOUR</i>	Estimation modèle BRIN	Parcours de développement entre levée de dormance et débourrement végétatif. Modèle de richardson	°C.heures	Variété	Tableau 13
	<i>STLEVAMF</i>	Expertise	Cumul d'unités de développement entre les stades LEV et AMF	°C.jours	Espèce	Tableau 13
	<i>STAMFLAX</i>	Bibliographie et B.D. PHENOCLIM	Cumul d'unités de développement entre les stades AMF et LAX	°C.jours	Variété	Tableau 13
	<i>STLEVDRP</i>	Bibliographie et B.D. PHENOCLIM	Cumul d'unités de développement entre les stades LEV et DRP	°C.jours	Variété	Tableau 13
	<i>STFLODRP</i>	Bibliographie et B.D. PHENOCLIM	Parcours de développement entre FLO et DRP (seulement indicatif)	°C.jours	Variété	Tableau 13
	<i>STDRPNOU</i>	Bibliographie et B.D. PHENOCLIM	Cumul d'unités de développement entre les stades DRP et NOU (fin de nouaison)	°C.jours	Variété	Tableau 13
	<i>STDRPDES</i>	Bibliographie et B.D. PHENOCLIM	Parcours de développement entre DRP et début de dynamique hydrique	°C.jours	Espèce	Tableau 13

Tableau 3. Valeur des différents paramètres qui définissent le feuillage.

Module		Paramètres	Origine du paramètre	Signification du paramètre	Unités	Paramètre dépendant de	Valeur
FEUILLAGE	Croissance	<i>PHYLLOTHERME</i>	Bibliographie	Durée séparant l'émission de deux feuilles sur la tige principale	°C Jour	Espèce	25
		<i>ADENS</i>	Expertise	Paramètre de compensation de la densité de plantes	SD	Espèce	0
		<i>BDENS</i>	Expertise	Densité minimale à partir de laquelle il y a compétition entre plantes pour la croissance foliaire	plantes m ⁻²	Espèce	1
		<i>VLAIMAX</i>	Expertise	Point d'inflexion de la fonction de croissance foliaire. Figure 15	SD	Espèce	2.2
		<i>PENTLAIMAX</i>	Expertise	Paramètre de la logistique du LAI. Figure 15	SD	Espèce	5
		<i>UDLAIMAX</i>	Expertise	Seuil à partir duquel la vitesse d'émission foliaire diminue. Figure 15	SD	Espèce	3
		<i>DLAIMAXBRUT</i>	Optimisation	Vitesse maximale de production de surface foliaire brute. Figure 15	m ² feuille plante ⁻¹ degré j ⁻¹	Espèce	Tableau 2-AnnexeIV
	Structure	<i>HAUTBASE</i>	Expertise et Mesures Expérimentations	Hauteur de base du végétal	m	Type de taille	Tableau 1414
		<i>HAUTMAX</i>	Expertise	Hauteur maximale du végétal	m	non actif	0
	Stress	<i>INNTURGMIN</i> *	Expertise	Paramètre de la fonction de stress azotée active sur la croissance foliaire (<i>INNLAI</i>), fonction bilinéaire de l'INN passant par le point (<i>INNMIN</i> , <i>INNTURGMIN</i>)	SD	Espèce	0.3
		<i>INNSENES</i> *	Optimisation	Paramètre de la fonction de stress azotée active sur la sénescence (<i>INNSENES</i>), fonction bilinéaire de l'inn passant par le point (<i>INNMIN</i> , <i>INNSEN</i>)	SD	Espèce	Tableau 2-AnnexeIV
		<i>RAPSENTURG</i>	Optimisation	Seuil d'humidité du sol actif pour le stress de sénescence en proportion du seuil de turgescence	SD	Espèce	Tableau 2-AnnexeIV
	Sénescence	<i>DURVIEF</i>	Expérimentation Sénescence des feuilles	Durée de vie d'un cm de feuille adulte exprimée en cumul de Q10=2 (Somme 2**(T-TMIN))	Q10	Espèce	400
		<i>RATIODURVIEI</i>	Expertise	Proportion de la durée de vie d'un cm de feuille adulte, qui sert au calcul de la durée de vie de premières feuilles		Espèce	1
		<i>PHOBASENSEN</i>	Expérimentation Sénescence des feuilles	Photopériode en-deça de laquelle le stress photopériodique sur la durée de vie des feuilles est activé	heures	Espèce	12
		<i>STRPHOTMENSEN</i>	Expérimentation Sénescence des feuilles	Seuil minimal de stress photopériodique à partir duquel, on considère que l'activité photosynthétique de la plante s'annule	t ha-1j ⁻¹	Espèce	0.15
		<i>DLTAMSMAXSEN</i>	Expérimentation Sénescence des feuilles	Valeur de deltam à partir duquel le stress photopériodique est nul sur la sénescence	t ha-1j ⁻¹	Espèce	0.01
		<i>ALPHAPHOT</i>	Expérimentation Sénescence des feuilles	Paramètre de calcul du stress photopériodique sur la durée de vie des feuilles	Q10	Espèce	200
		<i>RATIOSEN</i>	Expertise	Fraction de biomasse sénescente (par rapport à la biomasse totale)	entre 0 et 1	Espèce	0.8
		<i>ABSCISSION</i>	Expertise	Proportion de feuilles sénescentes qui tombent au sol	SD	Espèce	1
		<i>LAICOMP</i>	Expertise	LAI à partir duquel commence la compétition inter-plantes	m ² m ⁻²	Espèce	0

*Voir la notice de STICS pour plus de précisions

Tableau 4. Valeur et description de différents paramètres qui définissent le l'interception du rayonnement.

Module	Paramètres	Origine du paramètre	Signification du paramètre	Unités	Paramètre dépendant de	Valeur
INTERCEPTION DU RAYONNEMENT	<i>KTROU</i>	Expérimentation Simulation et Bibliographie	Coefficient d'extinction du PAR à travers le végétal (transferts radiatifs)	SD	Espèce	1.7
	<i>FORME</i>	Expertise	Forme du profil de densité foliaire du végétal	SD	Espèce	Triangle
	<i>RAPFORME</i>	Expertise	Rapport épaisseur/largeur de la forme du végétal (négatif quand base de la forme < sommet)	SD	Espèce	1.5
	<i>ADFOL</i>	BDE	Paramètre de la fonction d'évolution de la densité foliaire	m-1	Espèce	3.16
	<i>DFOLBAS</i>	BDE	Densité foliaire minimale dans la forme du végétal considérée	m ² feuille m ⁻³	Espèce	1.5
	<i>DFOLHAUT</i>	BDE	Densité foliaire maximale dans la forme du végétal considérée	m ² feuille m ⁻³	Espèce	11.5

Tableau 5. Valeur et description de différents paramètres qui définissent le la croissance en biomasse.

Module	Paramètres	Origine du paramètre	Signification du paramètre	Unités	Paramètre dépendant de	Valeur
CROISSANCE EN BIOMASSE	<i>EFCROIJUV</i>	Expertise	Efficiencie de croissance maximale pendant la phase juvénile (LEV-AMF). Tableau 1	g MJ ⁻¹	Espèce	1.2
	<i>EFCROIVEG</i>	Optimisation	Efficiencie de croissance maximale pendant la phase végétative (AMF-DRP). Tableau 1	g MJ ⁻¹	Espèce	Tableau 2- AnnexeIV
	<i>EFCROIREPRO</i>	Optimisation	Efficiencie de croissance maximale pendant la phase de remplissage des grains (DRP-MAT). Tableau 1	g MJ ⁻¹	Espèce	Tableau 2- AnnexeIV
	<i>REMOBRES</i>	Optimisation	Proportion de réserve remobilisable chaque jour. Tableau 1	SD	Espèce	Tableau 2- AnnexeIV

Tableau 6. Valeur et description de différents paramètres qui définissent la répartition entre organes.

Module	Paramètres	Origine du paramètre	Signification du paramètre	Unités	Paramètre dépendant de	Valeur
REPARTITION	<i>SLAMIN</i>	BDE et Expertise	Surface massique minimale des feuilles vertes	cm ² g ⁻¹	Espèce	100
	<i>SLAMAX</i>	Optimisation	Surface massique maximale des feuilles vertes	cm ² g ⁻¹	Espèce	Tableau 2-AnnexeIV
	<i>TIGEFUILL</i>	BDE et Bibliographie	Proportion tige (structurale)/feuille	SD	Espèce	0.9
	<i>ENVFRUIT</i>	Bibliographie et Expertise	Proportion enveloppe/pgrainmaxi en masse	SD	Espèce	0
	<i>SEA</i>	Bibliographie et Expertise	Surface spécifique des enveloppes des fruits	cm ² g ⁻¹	Espèce	0

Tableau 7. Valeur et description de différents paramètres qui définissent la compétition feuille/fruit.

Module	Paramètres	Origine du paramètre	Signification du paramètre	Unités	Paramètre dépendant de	Valeur
COMPETITION	<i>SPFRMIN</i>	Optimisation	Seuil minimal de sourcepuits permettant le calcul du stress trophique sur la mise en place des fruits	SD	Espèce	Tableau 2-AnnexeIV
	<i>SPFRMAX</i>	Expertise	Seuil maximal de sourcepuits permettant le calcul du stress trophique sur la mise en place des fruits	SD	Espèce	1
	<i>SPLAIMIN</i>	Optimisation	Seuil minimal de sourcepuits permettant le calcul du stress trophique sur le LAI	SD	Espèce	Tableau 2-AnnexeIV
	<i>SPLAIMAX</i>	Expertise	Seuil maximal de sourcepuits permettant le calcul du stress trophique sur le LAI	SD	Espèce	1

Tableau 8. Valeur et description de différents paramètres qui définissent le calcul du rendement.

Module		Paramètres	Origine du paramètre	Signification du paramètre	Unités	Paramètre dépendant de	Valeur
RENDEMENT	Composantes du rendement	<i>NBINFLO</i>	BDE	Nombre imposé d'inflorescences	nb pl ⁻¹	Type de taille et Espèce	Tableau 11
		<i>AFRUITPOT</i>	Optimisation	Nombre maximal de fruits noués par inflorescence et par degré.jour (croissance indéterminée)	nbfruits °C.jour ⁻¹	Variété	Tableau 2-AnnexeIV
		<i>PGRAINMAXI</i>	Optimisation	Poids maximal d'un grain (à 0% d'eau)	g	Variété	Tableau 2-AnnexeIV
	Croissance d'une baie	<i>NBOITE</i>	Expérimentation maturité du raisin	Nombre de "boites" ou "classes d'age" de fruits pour la croissance des fruits des plantes indéterminées	SD	Espèce	10
		<i>ALLOCAMX</i>	Expertise	Allocation maximale journalière d'assimilats vers les fruits	SD	Espèce	1
		<i>DUREEFRUIT</i>	Expérimentation maturité du raisin	Durée de croissance d'un fruit de la nouaison à la maturité physiologique	°C.jours	Espèce	Tableau 12
		<i>AFPF</i>	Expérimentation maturité du raisin	Paramètre de la logistique définissant la force des puits fruits (croissance indéterminée) : age relatif du fruit où la vitesse de croissance est maximale	SD	Espèce	0.55
		<i>BFPF</i>	Expérimentation maturité du raisin	Paramètre de la logistique définissant la force des puits fruits (croissance indéterminée) : vitesse de croissance maximale en proportion du poids maxi du fruit	SD	Espèce	18
		<i>CFPF</i>	Expérimentation maturité du raisin	Paramètre de la 1ère phase de croissance potentielle du fruit, phase exponentielle de multiplication cellulaire dans le fruit.	SD	Espèce	15
		<i>DFPF</i>	Expérimentation maturité du raisin	Paramètre de la 1ère phase de croissance potentielle du fruit, phase exponentielle de multiplication cellulaire dans le fruit.	SD	Espèce	0.2
	L'eau dans les fruits	<i>H2OFRVERT</i>	BDE	Teneur en eau des fruits verts (avant dynamique hydrique)	g eau g ⁻¹ MF	Espèce	0.925
		<i>DESHYDBASE</i>	Optimisation	Vitesse d'évolution de la teneur en eau des fruits (>0 ou <0)	% j ⁻¹	Variété	Tableau 2-AnnexeIV
		<i>TEMPDESHYD</i>	Optimisation	Augmentation de la deshydratation liée à l'augmentation (Tcult-Tair)	% eau °C ⁻¹	Espèce	Tableau 2-AnnexeIV
	Teneur en sucre et en azote des fruits	<i>VITPROPSUCRE</i>	BDE	Vitesse d'augmentation de l'indice de récolte sucre	g sucre g MS ⁻¹ j ⁻¹	Espèce	0.0029
		<i>VITIRAZO</i>	Optimisation	Vitesse d'augmentation de l'indice de récolte azote	g grain g plante ⁻¹ jour ⁻¹	Espèce	Tableau 2-AnnexeIV

Tableau 9. Valeur et description de différents paramètres qui définissent la croissance et le développement racinaire.

Module		Paramètres	Origine du paramètre	Signification du paramètre	Unités	Paramètre dépendant de	Valeur
RACINES	Développement	<i>STOPRAC</i>	Expertise	Stade d'arrêt de croissance racinaire (LAX ou SEN)	SD	Espèce	LAX
	Croissance en densité	<i>CROIRAC</i>	Expertise	Vitesse de croissance du front racinaire	cm degré.jour ⁻¹	Espèce	-
		<i>LVFRONT</i>	Expertise	Densité racinaire au niveau du front d'enracinement	cm racine.cm ⁻³ sol	Espèce	-
		<i>DRACLONG</i>	Bibliographie	Vitesse maximale de production de longueur racinaire par plante	cm racine plante ⁻¹ °C.jour ⁻¹	Espèce	40
		<i>DEBSENRAC</i>	Bibliographie	Somme de degrés.jours définissant le début de la sénescence racinaire (durée de vie d'une racine)	°C.jours	Espèce	2000
		<i>LONGSPERAC</i>	Bibliographie	Longueur spécifique des racines	cm g ⁻¹	Espèce	1021
		<i>SENSANOX</i>	Expertise	Sensibilité à l'anoxie (0=insensible)	SD	Espèce	0

Tableau 10. Valeur et description de différents paramètres qui définissent les indices de dégâts du gel.

Module		Paramètres	Origine du paramètre	Signification du paramètre	Unités	Paramètre dépendant de	Valeur
GEL		<i>TLETALE</i>	Bibliographie	Température létale pour la plante	°C	Espèce	-20
		<i>TDEBGEL</i>	Bibliographie	Température de début de gel	°C	Espèce	-1.5
	Entre LEV et AMF	<i>TGELJUV10</i>	Bibliographie	Température correspondant a 10 % de dégâts de gel sur le LAI (juvénile)	°C	Espèce	-2
		<i>TGELJUV90</i>	Bibliographie	Température correspondant a 90 % de dégâts de gel sur le LAI juvénile	°C	Espèce	-5
	A partir de AMF	<i>TGELVEG10</i>	Bibliographie	Température correspondant a 10 % de dégâts de gel sur le LAI (adulte)	°C	Espèce	-2
		<i>TGELVEG90</i>	Bibliographie	Température correspondant a 90 % de dégâts de gel sur le LAI (adulte)	°C	Espèce	-5
	Gel des fruits et des fleurs	<i>TGELFLO10</i>	Bibliographie	Température correspondant a 10 % de dégâts de gel sur les fleurs ou les fruits	°C	Espèce	-2
		<i>TGELFLO90</i>	Bibliographie	Température correspondant a 90 % de dégâts de gel sur les fleurs ou les fruits	°C	Espèce	-5

Tableau 11. Valeur et description de différents paramètres qui définissent l'eau dans la plante.

Module		Paramètres	Origine du paramètre	Signification du paramètre	Unités	Paramètre dépendant de	Valeur
EAU	Potentiels critiques et résistance stomatique	<i>PSISTO</i>	Bibliographie	Valeur absolue du potentiel de fermeture stomatique	bars	Espèce	15
		<i>PSITURG</i>	Bibliographie	Valeur absolue du potentiel de début de diminution de l'expansion cellulaire	bars	Espèce	6
		<i>RSMIN</i>	Optimisation	Résistance stomatique minimale	s m-1	Espèce	Tableau 2-AnnexeIV
	Teneur en eau des différents organes	<i>H2OFEUILVERTE</i>	BDE	Teneur en eau des feuilles vertes	g eau g-1 MF	Espèce	0.75
		<i>H2OFEUILJAUNE</i>	BDE	Teneur en eau des feuilles jaunes	g eau g-1 MF	Espèce	0.5
		<i>H2OTIGESTRUC</i>	BDE	Teneur en eau des tiges structurales	g eau g-1 MF	Espèce	0.7

Tableau 12. Valeur et description de différents paramètres qui définissent l'azote dans la plante.

Module		Paramètres	Origine du paramètre	Signification du paramètre	Unités	Paramètre dépendant de	Valeur
AZOTE	Courbes de dilution et stress azoté	<i>ADIL</i>	BDE	Paramètre de la courbe de dilution critique $[N_{\text{plante}}]=ADIL MS^{(-BDIL)}$	% MS	Espèce	3.3
		<i>BDIL</i>	Expertise	Paramètre de la courbe de dilution critique $[N_{\text{plante}}]=ADIL MS^{(-BDIL)}$	*	Espèce	0.44
		<i>MASECDIL</i>	Bibliographie	Biomasse aérienne à partir de laquelle il y a dilution de l'azote (courbes critique et maximale)	t ha ⁻¹	Espèce	1.6
		<i>NMETA</i>	BDE	Quantité d'azote métabolique dans la plantule (pourcentage de la biomasse aérienne)	%	Espèce	6
		<i>MASECMETA</i>	BDE	Biomasse de la plantule ne disposant que de son azote métabolique	t ha ⁻¹	Espèce	0.04
		<i>NRES</i>	Bibliographie	Quantité d'azote maximale de réserve de la plante (écart entre la courbe de dilution maximale et la courbe de dilution critique) (en pourcentage de la biomasse aérienne)	%	Espèce	1.6
		<i>INNMIN</i>	Expertise	Valeur minimale de inni (INN instantané) possible pour la culture	SD	Espèce	0.3
		<i>INNGRAIN1</i>	Expertise	INN minimal pour absorption nette d'azote maximale	SD	Espèce	1
		<i>INNGRAIN2</i>	Expertise	INN maximal pour absorption nette d'azote nulle	SD	Espèce	1
		<i>INNIMIN</i>	Optimisation	Valeur minimale de INN possible pour la culture	SD	Espèce	Tableau 2-AnnexeIV
	Absorption	<i>VMAX1</i>	Expertise	Vitesse maximale d'absorption du nitrate par le système d'absorption 1 (à forte affinité) des racines	μmole cm ⁻¹ h ⁻¹	Espèce	0.0018
		<i>VMAX2</i>	Optimisation	Vitesse maximale d'absorption du nitrate par le système d'absorption 2 (à faible affinité) des racines	μmole cm ⁻¹ h ⁻¹	Espèce	Tableau 2-AnnexeIV
		<i>KMAXBS1</i>	Expertise	Constante d'affinité du nitrate par le système d'absorption 1 (à forte affinité) des racines	μmole. cm racine ⁻¹	Espèce	50
		<i>KMAXBS2</i>	Expertise	Constante d'affinité du nitrate par le système d'absorption 2 (à faible affinité) des racines	μmole. cm racine ⁻¹	Espèce	25000

Annexe IV

Tableau 1. Paramètres des différents sols après ajustements de certains par optimisation et expertise.

Nom sol	% N organique	CaCO ₃	pH	albedo	q0 mm	obstacle racin. (cm)	Horizon	Epes. Horizon (cm)	Capacité au champs (%)	pfp (%)	da (g/cm ³)	% cailloux
		%										
Serres Syrah	0.07	13.00	8.0	0.30	3.50	94.80	1	25	20.0	9.4	1.45	48.6
							2	35	19.8	5.9	1.40	93.4
							3	65	15.0	5.5	1.60	0.0
Serres Grenache	0.07	13.00	8.0	0.30	1.00	190.40	1	10	20.0	9.4	1.45	49.4
							2	105	17.1	6.0	1.42	70.1
							3	85	20.4	3.7	1.45	66.9
Piolenc Grenache	0.15	35.80	8.2	0.30	4.80	159.40	1	10	30.6	17.4	1.50	10.1
							2	40	26.0	17.4	1.45	10.4
							3	150	26.7	16.8	1.45	10.4
Piolenc Syrah	0.15	35.80	8.2	0.30	4.80	182.70	1	10	30.6	17.4	1.50	10.1
							2	40	26.0	17.4	1.45	10.4
							3	150	26.7	16.8	1.45	10.4
Sauteyrargues	0.12	15.90	8.1	0.22	10.50	189.00	1	10	21.9	10.4	1.45	48.2
							2	110	23.3	13.8	1.43	71.5
							3	80	31.2	15.3	1.45	77.9
Bolchet	0.09	15.00	7.0	0.21	8.10	226.40	1	10	23.8	8.1	1.46	4.5
							2	50	23.9	7.6	1.42	41.1
							3	190	22.0	6.9	1.40	85.3
Marsannay	0.10	20.00	8.0	0.25	7.90	148.00	1	10	33.0	19.0	1.45	6.1
							2	40	29.2	19.0	1.40	9.5
							3	150	28.2	13.0	1.40	84.2
Fort Chabrol	0.20	14.40	8.2	0.10	0.00	100.00	1	10	27.5	8.5	1.50	0.0
							2	35	21.2	13.4	1.45	0.0 ⁽³⁾
							3	55	24.8	15.0	1.45	0.0 ⁽³⁾
Plumecoq	0.18	57.30	8.1	0.10	0.00	80.00	1	10	25.3	3.2	1.50	0.0
							2	40	22.9	9.7	1.45	0.0
							3	30	20.8	17.7	1.45	0.0
Montreuil Bellay	0.13	0.58	8.1	0.13	0.00	250.00	1	60	26.7	18.5	1.40	6.4
							2	25	24.8	22.8	1.29	25.6
							3	165	23.8	18.7	1.40	0.0
Sigogne	0.20	36.90	8.3	0.18	0.00	115.00	1	25	28.3	14.1	1.50	25.0
							2	25	27.0	14.2	1.43	80 ⁽¹⁾⁽³⁾
							3	65	21.5	10.9	1.43	95 ⁽¹⁾⁽³⁾
Juillac	0.13	22.05	8.3	0.18	0.00	110.00	1	35	29.9	15.4	1.50	20.0
							2	40	30.4	17.9	1.43	75 ⁽²⁾⁽³⁾
							3	35	26.6	13.8	1.43	95 ⁽²⁾⁽³⁾
Bordeaux Graves	0.05	6.30	8.3	0.18	0.00	200.00	1	53	16.7	8.6	1.50	17.9
							2	127	19.4	9.9	1.50	19.0
							3	20	15.9	10.1	1.46	55.0
Bordeaux Argile	0.04	2.40	8.2	0.22	0.00	200.00	1	10	19.1	5.7	1.45	13.0
							2	60	16.2	7.5	1.45	13.0
							3	130	24.2	14.9	1.19	4.0

⁽¹⁾ Les cailloux ont une capacité au champs de 7% pondéral et une masse volumique égal à 2.2 g/cm³

⁽²⁾ Les cailloux ont une capacité au champs de 16% pondéral et une masse volumique égal à 1.8 g/cm³

⁽³⁾ Des remontés capillaires ont été prise en compte.

En gris les paramètres estimés par optimisation. En italique les paramètres contrôlés par expertise. Le reste des paramètres sont issus des analyses et des mesures dans les fosses.

Annexe V

Tableau 1. Anomalies calculés entre les données du scénario Contrôle et les données des scénarios A2 et B2 du modèle ARPEGE-Climat, pour chacune des régions de l'étude.

Côtes du Rhône												
Mois	Pluviométrie (Rapport)		Température minimale		Température Maximale		Pression de vapor		Rayonnement		Vent	
	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2
Janvier	1.4	1.2	3.4	1.9	4	2.6	2.5	1.8	-4.4	0.1	0	-0.1
Février	1.1	1.1	2.5	1.6	2.5	2	-0.1	0.3	-1.8	2.6	0.1	0
Mars	1.2	1	2.8	1.8	2.3	1.7	0.2	-1.5	-3.8	4.8	-0.1	0
Avril	0.8	0.8	2.9	2.2	2.7	2.4	-1.5	-2.8	1.1	7.3	0.1	0.1
Mai	0.5	0.7	3.9	2.9	4.8	3.4	-9.8	-6.1	15.8	14.2	0.1	0
Juin	0.7	0.8	4.5	2.9	5.2	3.2	-10.2	-4.8	9.6	9.2	0.2	0.1
Juillet	0.6	0.7	4.9	3.5	5.3	3.9	-9.2	-5.7	3.3	7.2	0	0.1
Août	0.9	1.1	5.1	3.1	4.9	2.6	-6.1	-2.5	-2	-1.8	-0.1	-0.1
Septembre	1.1	1.7	4.6	2.9	4.3	2.3	-4.9	0.7	-3.7	-8.7	0	-0.1
Octobre	0.9	0.9	3.4	1.5	3	1.2	0.1	0.4	-3.1	-1.9	-0.1	0
Novembre	0.8	0.8	3.2	1.3	3.3	1.6	0	0.6	-1.3	-0.7	-0.2	-0.1
Décembre	0.9	1.3	2.3	1.8	3	2.1	-0.6	0.7	-0.3	-0.9	-0.1	0.1

Bordeaux												
Mois	Pluviométrie (Rapport)		Température minimale		Température Maximale		Pression de vapor		Rayonnement		Vent	
	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2
Janvier	1.3	1	3.3	1.6	2.7	1.6	0	-0.3	-2.2	1.7	0.3	0
Février	1	1.1	1.5	1	1.4	1.2	0.1	-1	-0.4	4.2	-0.2	0
Mars	1.1	0.8	2.2	1.3	1.9	1.6	-1.1	-1.3	-0.6	7.1	0.1	-0.1
Avril	0.9	0.9	2.3	1.6	2.4	1.9	-1.1	-1.2	4.6	7.5	0	0
Mai	0.7	0.7	2.9	2.1	3.5	2.7	-3	-2.8	9.9	16.1	-0.1	0
Juin	0.6	0.8	3.2	2.1	3.4	2.2	-4.9	-3.5	9.4	5.3	0.1	0.1
Juillet	0.4	0.5	4.3	3.2	5.2	4.4	-11.1	-9	14.3	15.6	0.3	0.2
Août	0.6	0.8	4.5	2.9	5	3.3	-10.5	-6.7	5.1	2.6	0.3	0.2
Septembre	0.8	0.9	3.6	2.7	4	3.1	-7.4	-3.7	6.5	1.6	0	-0.1
Octobre	1.1	1	3.2	1.5	2.9	1.6	-1.9	-1.9	-4	-2.3	-0.1	0
Novembre	0.8	0.9	3.5	1.9	3.4	2	-2.3	-1.2	-1.4	-2.2	-0.1	-0.1
Décembre	1	1	2.4	1.1	2.4	1.3	-0.8	0.1	-1.7	-1.5	-0.1	-0.3

Bourgogne												
Mois	Pluviométrie (Rapport)		Température minimale		Température Maximale		Pression de vapor		Rayonnement		Vent	
	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2
Janvier	1.3	1	3.5	1.7	3.7	2.1	0.4	0.2	-2.4	2.4	0.4	0
Février	0.9	1	1.9	1.4	2.3	1.8	-0.4	-0.7	2.2	6.1	0	0.1
Mars	1.2	0.9	2.3	1.3	2.3	1.8	-0.4	-0.7	-2.2	6	0	-0.2
Avril	1.1	1.1	2.6	1.9	2.3	1.8	0.1	0.2	-2.2	-0.6	0.1	0
Mai	0.8	0.9	3	2.2	3.2	2.3	-1.7	-0.9	12.3	15	-0.1	-0.1
Juin	1	1.2	3	2	2.8	1.7	-2.1	0.2	0.9	0.3	0	0
Juillet	0.7	0.8	4.1	2.6	5.2	3.3	-9.8	-4.4	21	21.4	0	0
Août	0.6	0.9	5.3	2.7	6.6	3.4	-15.6	-7.6	16.4	11.8	0.1	0
Septembre	0.8	0.9	4.6	3.2	4.9	3.3	-10.9	-4.6	3.3	-1.2	0	0
Octobre	1	0.9	3.6	1.8	3.4	1.5	-1.9	-0.2	-1.7	-3.4	-0.1	0
Novembre	1.1	1.1	3.2	1.9	3.3	1.8	-0.4	0.3	-2.5	-4	-0.1	0
Décembre	1.1	1.1	2.4	1.7	2.6	1.7	0.1	0.4	-1.1	-0.7	0	-0.1

Anjou												
Mois	Pluviométrie (Rapport)		Température minimale		Température Maximale		Pression de vapor		Rayonnement		Vent	
	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2
Janvier	1.4	1.1	3	1.3	2.6	1.3	0.3	0.2	-1.8	1.3	0.4	-0.1
Février	1	1.1	1.6	1	1.4	1.1	0.3	-1	1	6.5	-0.2	0.2
Mars	1.2	0.8	2.2	1.3	1.9	1.5	-0.4	-1.3	-1.6	7.7	0.1	-0.1
Avril	1	0.9	2.2	1.7	2	1.5	0.2	-0.4	0.5	2.6	0.1	0
Mai	0.8	0.7	2.9	2.3	2.7	2.2	-1.5	-1.8	5.5	12.6	0.1	0
Juin	0.7	1	3.1	2.2	2.8	2	-4.6	-3.7	5.9	2.9	0.2	0.1
Juillet	0.5	0.6	4.4	3.2	5.2	4.2	-13.5	-11.1	17.6	22.5	0.3	0.2
Août	0.7	0.8	4.9	3	5.9	3.6	-14	-10.1	6	2.6	0.3	0.2
Septembre	0.8	0.8	4	3.1	4.1	3.5	-10	-7.4	3.5	3.8	0.1	0
Octobre	1.1	1	3.3	1.8	3	1.7	-1.4	-1.2	-1.3	-1.3	-0.1	0
Novembre	1	1	3.5	2.3	3.3	2.1	-1.1	-0.4	-0.4	-1.6	0.1	0
Décembre	1.1	1	2.4	1.1	2.3	1.3	0.1	0.5	-0.8	-0.4	-0.1	-0.3

Languedoc												
Mois	Pluviometrie (Rapport)		Température minimale		Température Maximale		Pression de vapor		Rayonnement		Vent	
	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2
Janvier	1.3	1.4	3.7	2.1	3.7	2.3	1.3	1.2	-4.4	-0.4	0	-0.1
Fevrier	1.4	1.4	2.7	1.7	2.1	1.7	-0.6	-0.7	-4.1	2.8	0.1	0
Mars	1.1	1.2	2.8	1.9	2.1	1.6	1.2	-0.5	-3.7	4.4	-0.1	0
Avril	0.9	0.8	2.7	2	2.5	2.2	-0.8	-1.9	1.7	7	0	0
Mai	0.6	0.7	3.5	2.8	4	3.2	-6.9	-5.7	12.4	13.9	0	0
Juin	0.6	0.8	4.3	2.9	4.7	3	-8.4	-4.3	4.7	5.6	0.1	0.1
Juillet	0.6	0.8	4.8	3.5	5.1	3.7	-8.6	-4.8	1.8	5.8	0	0.1
Août	1	1.2	4.9	3.1	4.7	2.7	-6	-2.5	-2.8	-2.5	-0.1	-0.1
Septembre	1.1	1.5	4.5	2.8	4.3	2.3	-5.6	-0.3	-3.5	-7.3	0	-0.1
Octobre	0.9	0.9	3.5	1.6	3	1.4	-0.5	-0.4	-1.5	-0.4	-0.2	0
Novembre	1	0.9	3.5	1.7	3.1	1.6	0.3	0.6	-2.2	-1.4	-0.2	0
Décembre	0.8	1.4	2.6	1.9	2.8	1.9	-0.6	0.6	-0.6	-1.6	-0.1	0

Champagne												
Mois	Pluviometrie (Rapport)		Température minimale		Température Maximale		Pression de vapor		Rayonnement		Vent	
	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2
Janvier	1.3	1	3.4	1.7	3.4	1.9	0.3	0.3	-1.4	2.1	0.5	0
Fevrier	1	1	1.9	1.3	2	1.6	-0.2	-0.9	1.6	5.8	0	0.2
Mars	1.1	0.9	2.1	1.3	2.1	1.7	-0.3	-1	-0.5	7.8	0.1	-0.1
Avril	1.1	1.1	2.7	2	2.1	1.7	0.7	1	-3.6	0.3	0.1	0
Mai	0.9	0.9	3	2.2	2.7	2.1	-1.1	-1	6	13	0	0
Juin	0.9	1.1	2.9	1.9	2.7	1.8	-3.6	-1.8	1.5	-0.2	0.1	0.1
Juillet	0.7	0.8	4	2.9	4.8	3.8	-10.2	-8.2	16.1	23.6	0.2	0.1
Août	0.7	0.9	5	3	6.1	3.7	-12.5	-9	13.5	9.8	0.2	0.1
Septembre	0.9	0.9	4	3	4.2	3.3	-8.9	-6.3	0.6	3.7	-0.1	0
Octobre	1.1	1.1	3.5	2	3.3	1.7	-1	0	-1.3	-2.5	-0.1	0
Novembre	1.2	1.1	3.2	2.1	3.3	2	-0.3	0.5	-1.1	-2.9	0	0.1
Décembre	1.2	1	2.3	1.5	2.5	1.6	0.2	0.3	0.3	-0.3	0	-0.1

Cognac												
Mois	Pluviometrie (Rapport)		Température minimale		Température Maximale		Pression de vapor		Rayonnement		Vent	
	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2	Réelles - A2	Réelles - B2
Janvier	1.4	1.1	3.1	1.5	2.4	1.3	0.4	-0.2	-2.4	2.1	0.5	-0.1
Fevrier	0.9	1	1.4	1	1.3	1	0.6	-1.1	1.2	4.7	-0.2	0.2
Mars	1.1	0.8	2.3	1.3	1.7	1.4	-0.7	-1.4	-2.9	6.4	0.2	-0.2
Avril	1	0.9	2.3	1.5	2.2	1.5	-0.8	-0.3	4.4	4.1	0.1	-0.1
Mai	0.7	0.8	2.8	2.2	2.9	2.4	-2.1	-2.4	4.3	12.3	0	0
Juin	0.6	0.9	3	2	3	2	-4.5	-3	6.1	4	0.2	0.1
Juillet	0.5	0.6	4.1	3.1	4.7	3.9	-10.9	-8.9	11.5	15.5	0.4	0.2
Août	0.7	0.8	4.4	2.8	4.7	2.8	-10.3	-6	2.9	0.8	0.2	0.2
Septembre	0.8	0.9	3.6	2.8	3.7	2.9	-7.6	-4.1	4.5	1.5	0	-0.1
Octobre	1.1	1.1	3.1	1.6	2.6	1.5	-1	-1.3	-4	-3	-0.1	-0.1
Novembre	0.8	1	3.5	2.3	3	2	-0.7	-0.6	-0.7	-1.3	0	-0.1
Décembre	1	1	2.4	1.1	2.2	1.3	0.3	0.5	-1.1	-0.9	-0.1	-0.4

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.

Iñaki GARCIA DE CORTAZAR ATAURI

RESUME

Les modèles de cultures, qui se sont développés depuis une trentaine d'années, offrent un cadre conceptuel pour étudier les interactions dynamiques entre la plante, le sol, le climat et les techniques culturales à l'échelle parcellaire. Le travail a eu comme objectif d'adapter un modèle générique de cultures, le modèle STICS, à la vigne à l'échelle des grands vignobles de France pour ensuite l'appliquer à une étude d'impact du changement climatique à la même échelle. Pour réaliser ce travail, un important réseau de collaborations avec différents organismes de recherche, techniques et professionnels a été mis en place dans les régions de Côtes du Rhône, Languedoc, Bordeaux, Cognac, Bourgogne, Anjou et Champagne. Deux bases des données ont été créées à partir de ces collaborations : une base de données écophysiological regroupant les données d'expérimentations menées pendant deux ans dans les différents vignobles, et une base de données historiques constituée à partir de données d'expérimentations anciennes. Pour l'adaptation du modèle, nous avons mis en place une méthodologie consistant dans un premier temps à faire l'analyse des différents formalismes existants et à en proposer de nouveaux susceptibles d'améliorer la description du fonctionnement de la vigne; dans un deuxième temps, nous avons réalisé le paramétrage du modèle à partir de la base de données écophysiological et de la bibliographie. Enfin, nous avons évalué le modèle sur la base de données historiques. Les résultats obtenus s'avèrent satisfaisants, en particulier pour que le modèle serve d'outil de prospective dans le cadre d'études d'impact. De plus, la robustesse du modèle ainsi adapté à la vigne permet de l'utiliser à l'échelle de la France. L'étude d'impact du changement climatique à l'échelle de l'ensemble du vignoble français a été réalisée à partir de l'utilisation conjointe du modèle STICS et des données climatiques simulées par le modèle ARPEGE-Climat (Météo-France). Pour étudier ces impacts, nous avons défini des structures de plantation et des techniques traditionnelles pour chaque région. Les principaux résultats montrent une importante modification de la phénologie, ainsi qu'une augmentation de la biomasse végétative et du rendement (sauf dans les vignobles de Côtes du Rhône et Languedoc pour lesquels on observe une diminution), une augmentation du stress hydrique à la fin du cycle et une importante modification des conditions climatiques de la période véraison-récolte. Suite à ces résultats, nous avons proposé différentes combinaisons techniques afin d'adapter la conduite de la vigne aux modifications du climat. Il en résulte de propositions de stratégies d'adaptation pour chacune des régions.

Mots-clés: *Vitis vinifera* L., modèle, adaptation, vignoble, France, changement climatique, impact

Adaptation of crop model STICS to the grapevine (*Vitis vinifera* L.). Use for an impact study of the climatic change on the scale of France.

Iñaki GARCIA DE CORTAZAR ATAURI

RESUME

Crop models developed since about thirty years offer a conceptual framework to study the dynamic interactions between the plant, the soil, the climate and the farming practices on a field scale. This work had like objective to adapt a generic crop model, STICS, to the grapevine on the scale of the most important vineyards of France for then applying it to an impact study of the climatic change on the same scale. To complete this work, an important network of collaborations with various organizations of research, techniques and professionals was set up in the areas of Rhone valley, Languedoc, Bordeaux, Cognac, Burgundy, Anjou and Champagne. Two data bases were created starting from these collaborations: an ecophysiological data base compiling the data of experiments carried out during two years in the different vineyards, and a historical data base made up starting from data of past experiments. For the adaptation of the model, we set up a methodology initially consisting in making the analysis of the various existing formalisms and proposing the new likely ones to improve the description of processes of the vine; in the second time, we carried out the parameter setting of the model starting from the ecophysiological data base and of the bibliography. Finally we evaluated the model with the historical data base. The obtained results prove to be satisfactory into particular, so that the model may be use as a tool for the framework of impact studies. Moreover, the robustness of the model thus adapted to the vine makes it possible to use it on the scale of France. The impact study of the climatic change on the scale of the whole of the French vineyard was carried out starting from the joint use of STICS model and the climatic data simulated by the model ARPEGE-Climat (Météo-France). To study these impacts, we defined the traditional technical practices for each area. The principal results show an important modification of phenology, as well as an increase in the vegetative biomass and yield (except in the vineyards of the Rhone valley and Languedoc for which one observes a reduction), an increase in the water stress at the end of the cycle and an important modification of the climatic conditions of the period veraison-harvest. Following these results, we proposed various technical combinations in order to adapt the culture of the grapevine to the modifications of the climate. The principal result is the proposition of adaptation strategies for each vineyard.

Mots-clés: *Vitis vinifera* L., crop model, adaptation, vineyard, France, climatic change, impact

**Adaptacion del modelo STICS a la viña (*Vitis vinifera* L.).
Utilizacion en un estudio de impactos del cambio climatico en los viñedos de
Francia.**

Iñaki GARCIA DE CORTAZAR ATAURI

RESUMEN

Los modelos de cultivos, que se han desarrollado durante los últimos treinta años, ofrecen un marco conceptual para estudiar las interacciones dinámicas entre la planta, el suelo, el clima y las técnicas de cultivo, a escala de la parcela. Así pues, este trabajo tenía como objetivo adaptar un modelo genérico de cultivos (el modelo STICS), a la viña a nivel de los grandes viñedos de Francia y a continuación, aplicarlo a un estudio de impacto del cambio climático a la misma escala. Para realizar este trabajo, se ha creado una importante red de colaboraciones con distintos organismos de investigación, técnicos y profesionales en las regiones del Valle del Ródano, Languedoc, Burdeos, Coñac, Borgoña, Anjou y Champaña. Se crearon dos bases de datos a partir de estas colaboraciones: una base de datos éco-fisiológicos que agrupa los datos de experimentaciones realizadas durante dos años en los distintos viñedos, y una base de datos históricos constituida a partir de datos de antiguas experimentaciones. Para la adaptación del modelo, se estableció una metodología que consistía inicialmente en realizar un análisis de los distintos formalismos existentes y en proponer nuevos susceptibles de mejorar la descripción del funcionamiento de la viña; después se realizó la parametrización del modelo a partir de la base de datos éco-fisiológicos y de la bibliografía. Finalmente se evaluó el modelo sobre la base de datos históricos. Los resultados obtenidos resultan satisfactorios, en particular, para que el modelo sirva como herramienta de prospección en el marco de estudios de impacto. Además, la robustez del modelo adaptado a la viña permite su utilización a nivel de Francia. El estudio de impacto del cambio climático en el conjunto del viñedo francés se realizó a partir de la utilización conjunta del modelo STICS y de los datos climáticos simulados por el modelo ARPEGE-Climat (Météo-France). Para estudiar estos impactos, se definieron las estructuras de plantación y las técnicas de cultivo tradicionales de cada región. Los principales resultados muestran una importante modificación de la fenología, así como un aumento de la biomasa vegetativa y del rendimiento (excepto en los viñedos del Valle del Ródano y del Languedoc en los que se observa una disminución), un aumento del stress hídrico al final del ciclo y una importante modificación de las condiciones climáticas del período enero- cosecha. A raíz de estos resultados, se sugieren varias combinaciones técnicas con el fin de adaptar el cultivo de la viña a las modificaciones del clima. El resultado final es la proposición de estrategias de adaptación para cada una de las regiones.

Palabras claves : *Vitis vinifera* L., modelo, adaptación, viñedo, Francia, cambio climático, impactos