

Application du modèle couplé à un cas réel

10.1 Introduction

Le modèle couplé a été construit dans l'objectif d'expérimenter virtuellement, et à l'échelle de bassins versants, différentes combinaisons de conduites techniques d'exploitation pour en évaluer les impacts en terme de pollution de l'eau par les pesticides. Dans les chapitres précédents, les différents modèles thématiques et leur couplage ont été présentés. Dans ce chapitre, on va illustrer différentes sorties que peut produire à ce jour le modèle couplé compte tenu de son niveau de développement. Pour ce faire, une application pour trois exploitations est présentée. Le modèle couplé présenté à la figure 9.4 est testé avec des données réelles (et non virtuelles), on discute ainsi la cohérence des résultats obtenus au regard des données d'observations disponibles et les futurs besoins de validation de l'outil.

L'application du modèle couplé à trois exploitations permet de présenter les résultats obtenus pour des variables de sortie de modèles thématiques unitaires : (i) le déroulé des actions culturales pour le modèle décisionnel DHIVINE et (ii) la dynamique des états de surface sur sol nu et de la couverture herbacée pour les modèles biophysiques d'évolution des états de surfaces. On présente également les résultats obtenus pour l'une des variables de pression entre les processus décisionnels et hydrologiques : l'infiltrabilité de la surface du sol.

Les objectifs de l'application du modèle couplé sont de :

- vérifier les résultats fournis par le modèle décisionnel, c'est à dire de faire la démonstration que le modèle informatique et son implémentation est correcte (Sargent., 1991) ; en effet, les actions simulées par le modèle DHIVINE dépendent d'indicateurs produits par les modèles biophysiques, les sorties du modèle décisionnel doivent donc être vérifiées en situation de couplage ;
- présenter et discuter les approches de validation du modèle couplé à partir des résultats.

10.2 Matériel et Méthodes

10.2.1 La zone et la période d'étude

Le modèle couplé a été testé sur le bassin versant expérimental de Roujan. Ce bassin, d'une surface d'1 km² environ et inclus dans le bassin versant de la Peyne, fait partie du réseau national d'Observatoires de Recherche en Environnement OMERE (Voltz et Albergel, 2002).

Des mesures météorologiques et hydrologiques y sont réalisées depuis 1992 ; des observations d'états de surface selon la typologie d'Andrieux et al. (2001) sont régulièrement effectuées (au moins tous les 2 mois) depuis 2002. De plus, des enquêtes auprès des viticulteurs sur leurs opérations d'entretien du sol effectuées sur les parcelles du bassin ont été réalisées entre 2002 et 2006. Par conséquent, les données associées au bassin versant en font une zone adaptée à l'application du modèle couplé en situation réelle. Toutefois, il a été nécessaire d'acquérir les données nécessaires à la paramétrisation du modèle décisionnel : les informations sur le parcellaire, le matériel, la main d'oeuvre, la conduite technique des exploitations. Des enquêtes ont donc été réalisées au printemps 2010 chez 13 viticulteurs pour la période 2002-2006 (pour laquelle les données sur les pratiques sont les plus nombreuses). Compte-tenu que ces données ne permettaient pas de simuler l'ensemble des exploitations présentes sur le bassin versant et donc les flux à l'exutoire du bassin, nous avons fait le choix de limiter l'application du modèle à trois exploitations aux caractéristiques variées pour illustrer les productions du modèle. On présente les exploitations au paragraphe suivant.

L'année culturale simulée est l'année 2004-2005 (du 1er septembre au 31 août). Les caractéristiques climatiques (pluviométrie et températures) de l'année sont présentées par la figure 10.1.

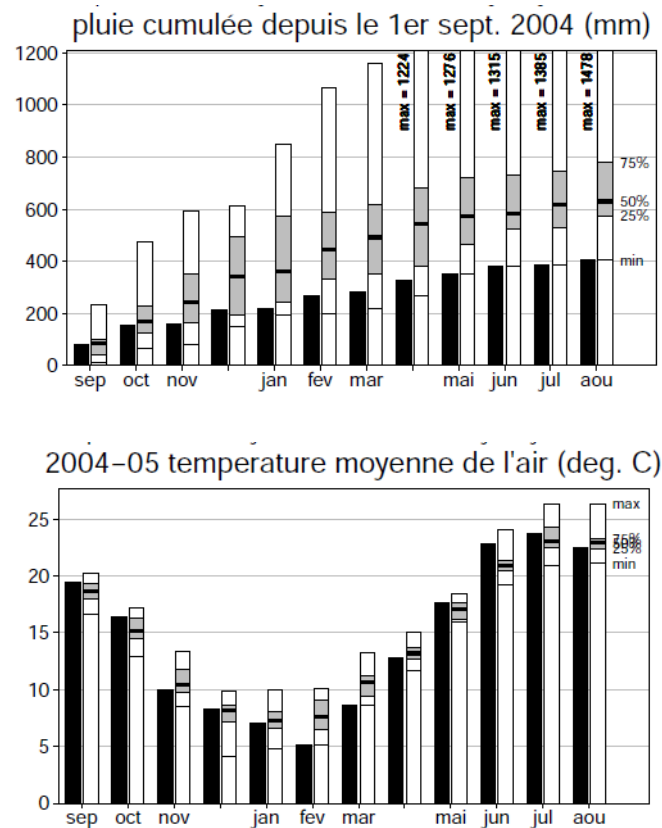


FIGURE 10.1 – Climat de l'année culturale 2004-2005 (pluviométrie cumulée et température moyenne)

Les données climatiques de l'année sont en noires. Les bâtons blancs donnent les valeurs de référence calculées et les statistiques associées sur la chronique 1992-2010.

En terme de pluviométrie, on peut voir que l'année 2004-2005 est sèche : dès novembre 2004 le cumul est au niveau du 1er quartile des valeurs de référence pour la chronique 1992-2010 et à partir de mai, les cumuls correspondent aux minima enregistrés au cours de la chronique. En terme de température, la majorité des températures moyennes mensuelles sont comprises entre le 1er et le 3ème quartile des valeurs de référence pour la chronique 1992-2010. On notera tout de même que les mois de février et mars 2005 sont les mois de février et mars les plus froids enregistrés entre 1992 et 2010.

10.2.2 Les exploitations agricoles et leurs conduites techniques

Les caractéristiques des trois exploitations (codées MG16, NP13 et NP06) sont présentées dans le tableau 10.1. Elles ont été choisies pour leur caractéristiques différentes en matière de parcellaire, de ressources et de conduites techniques ainsi que pour leur représentativité dans la zone d'étude. La figure 10.2 présente la répartition spatiale de leur parcellaire. Les données concernent l'année 2004-2005.

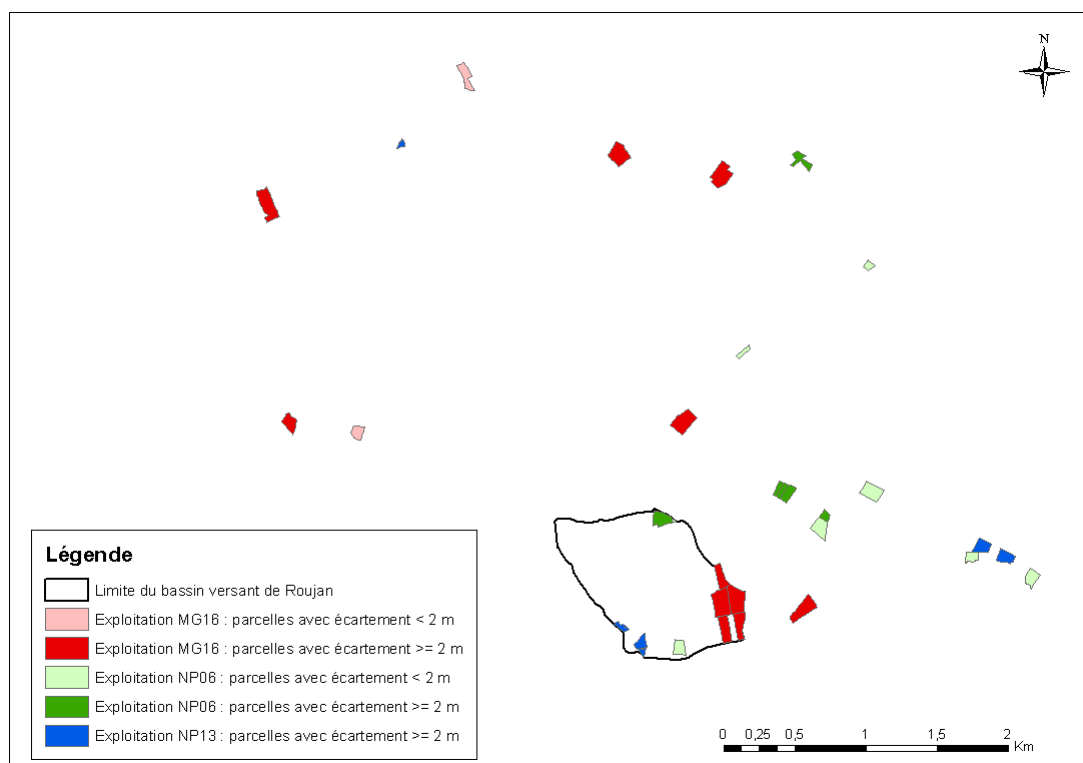


FIGURE 10.2 – Parcellaires en vigne des trois exploitations agricoles étudiées

La première exploitation, MG16, possède une surface de 18,3 ha. Le parcellaire est dispersé et se compose essentiellement de parcelles avec des écartements entre rangs de 2 m ou plus. Les cépages cultivés sont majoritairement des cépages rouges présents depuis longtemps dans la région : le carignan, le cinsaut, l'alicante bouschet, le grenache et la syrah. Les exploitants cultivent également des cépages plantés plus récemment dans la région : le cabernet sauvignon

(cépage rouge) et du chardonnay (cépage blanc).

L'exploitation est conduite par trois viticulteurs de la même famille qui ont tous d'autres activités par ailleurs. L'organisation repose plutôt sur une distribution des tâches, chacun étant responsable de travaux différents, sauf pour les travaux manuels (e.g. taille) auxquels ils participent tous en fonction de leurs disponibilités. Ils bénéficient d'une main d'oeuvre supplémentaire pour la réalisation de la taille. Ils ont deux tracteurs, une gamme variée de pulvérisateurs mais un seul outil pour le travail du sol.

La stratégie d'entretien du sol est la combinaison dans l'espace d'enherbement (1 inter-rang sur 2) et de travail du sol (1 inter-rang sur 2) pour les parcelles à écartement entre rangs large. Dans ces parcelles, les rangs sont désherbés chimiquement. Les parcelles étroites (écartement entre rang inférieur à 2 m) sont entièrement entretenues par désherbage chimique. Les viticulteurs alternent les inter-rangs enherbés et travaillés chaque année, c'est à dire qu'une année un inter-rang est travaillé et que l'année suivante, il est enherbé. Ils ne réalisent des travaux du sol qu'au printemps (2 à 3) qu'ils déclenchent sur la présence d'une couverture herbacée. Le désherbage chimique est réalisé avec un post-levée seul donc sur des surfaces présentant un couvert herbacé développé. Il est organisé de telle sorte qu'il soit terminé au débourrement de la vigne. Il est systématiquement renouvelé au cours du printemps.

La stratégie de protection phytosanitaire est de type raisonnée. Les parcelles sont divisées en deux lots pour le démarrage de la protection anti-oïdium : les cépages sensibles et précoces (carignan et chardonnay) sont protégés une première fois puis la protection est élargie à l'ensemble des parcelles à partir du second traitement avec un renouvellement selon une cadence de 15 jours. La protection anti-oïdium s'arrête quand le carignan a atteint le stade début véraison. La protection anti-mildiou n'inclue aucun traitement systématique. C'est à dire qu'elle n'est commencée que si la maladie se déclare (découverte de foyers primaires dans la zone) puis elle est poursuivie tant que le risque de développement de la maladie est présent (pression). Les modalités de pulvérisation changent au cours du cycle végétatif : pour le premier traitement, quand la végétation est peu développée et les parcelles à traiter peu nombreuses, les viticulteurs mettent en oeuvre une pulvérisation de précision avec des lances à main en passant 1 inter-rang sur 2. Les lances à main branchées à la cuve sont tenues par deux personnes qui traitent chacune un rang. A partir du second traitement, ils emploient un pulvérisateur pneumatique et passent 1 inter-rang sur 3 (une personne suffit alors pour conduire le tracteur et réaliser la pulvérisation pour une parcelle).

Finalement, chez ces viticulteurs, la taille débute à la mi-novembre, le broyage des sarments est réalisé sur la fin de la taille et il n'y a pas de fertilisation.

La seconde exploitation, NP13, possède une surface de 2,97 ha. Elle est tenue par un viticulteur à la retraite. Le parcellaire est également dispersé mais il ne comprend que des parcelles à écartement entre rangs supérieur à 2 m¹. Les cépages cultivés sont tous des cépages rouges : carignan, grenache, syrah et cabernet sauvignon. Le viticulteur possède un tracteur, une gamme de pulvérisateurs et deux outils différents pour le travail du sol.

La stratégie d'entretien du sol mise en oeuvre est une combinaison dans l'espace de désherbage chimique (1 inter-rang sur 4) et de travail du sol (3 inter-rangs sur 4). Les rangs sont entretenus par désherbage chimique. Le viticulteur réalise régulièrement des travaux du sol sur les surfaces concernées : 1 fois à l'automne, 1 fois en sortie d'hiver (reprise) et 2 à 3 fois au printemps. A l'automne et en sortie d'hiver, le travail du sol est déclenché en fonction

1. Quand ils choisissent de continuer à cultiver une partie de leurs parcelles pendant leur retraite les viticulteurs conservent souvent des parcelles pour lesquels le travail est aisément mécanisable donc les parcelles à écartements larges.

de l'avancée d'autres travaux (vendanges, broyage des sarments, fertilisation). Au printemps, il dépend de la présence d'une couverture herbacée dans les inter-rangs à travailler mais après un évènement pluvieux conséquent, le viticulteur peut également travailler le sol (il profite des conditions adéquates pour le travail du sol après ressuyage et il anticipe sur la croissance des plantes herbacées). Le désherbage chimique est réalisé avec une combinaison d'herbicides de pré et de post-levée quand les autres travaux (taille, fertilisation, broyage et travail du sol de reprise) sont terminés et quand l'herbe est présente dans les parcelles. Un second désherbage est réalisé au printemps avec un herbicide de post-levée, systématiquement sur les inter-rangs et de manière facultative sur les rangs en fonction de la croissance de l'herbe.

La stratégie de protection phytosanitaire est de type raisonné. La gestion des anti-oïdium est similaire à celle réalisée dans l'exploitation MG16. La protection contre le mildiou est, toutefois, moins raisonnée puisque, quelque soit l'année, le viticulteur applique systématiquement des fongicides anti-mildiou pendant la période de floraison pour se garantir une protection maximale lors de cette période de haute-sensibilité de la vigne. En dehors de ces traitements systématiques, le déclenchement d'une protection est déterminée par la présence de foyers primaires dans la zone et s'arrête avec la protection anti-oïdium quand le carignan atteint le stade début véraison. Les modalités de pulvérisation s'adaptent fortement au développement de la végétation. Les deux premiers traitements sont réalisés à la lance à main 1 inter-rang sur 2 (pour ces opérations très ponctuelles, on suppose que le viticulteur bénéficie d'une aide en main d'oeuvre manuelle pour « tenir » la deuxième lance). Ensuite, jusqu'à la floraison, les traitements sont réalisés au pulvérisateur pneumatique 1 inter-rang sur 4 en empruntant les inter-rangs désherbés chimiquement et donc compactés. Ils posent ainsi peu de problème de traficabilité en cas d'évènements pluvieux importants. Finalement à partir de la floraison, les traitements sont réalisés 1 inter-rang sur 3 pour favoriser une bonne pénétration des fongicides dans la végétation. Il est à noter qu'à partir de ce moment (juin), les problèmes de traficabilité sont peu courants.

Concernant les autres travaux, la taille débute début décembre et le broyage des sarments est réalisé au fur et à mesure de la taille. Une fertilisation est effectuée en fin d'hiver.

La troisième exploitation, NP06, possède une surface de 8,86 ha. Le parcellaire se caractérise par une grande part de parcelles avec des écartements entre rang inférieurs à 2 m (5,28 ha). Les cépages cultivés sont tous des cépages rouges : carignan, grenache, aramon, merlot et cinsaut.

Le viticulteur est à temps plein sur son exploitation. Il bénéficie d'une main d'oeuvre supplémentaire pour la taille. Il possède un tracteur. Il a un matériel de pulvérisation peu diversifié : un pulvérisateur pneumatique pour la protection phytosanitaire, une rampe horizontale pour le désherbage chimique et un pulvérisateur à dos pour toutes les pulvérisations dans les parcelles à l'intérieur desquelles le tracteur n'entre pas. Il n'a pas de matériel de broyage des sarments car ils sont sortis des parcelles et non broyés. Il n'a pas non plus de matériel de travail du sol. En effet, toutes les parcelles sont entièrement entretenues par désherbage chimique. Il ne réalise donc pas de travail du sol. Le désherbage chimique est réalisé avec une combinaison d'herbicides de pré et post-levée une seule fois en fin d'hiver en cherchant à le positionner le plus tardivement possible avant le débourrement de la vigne pour détruire le plus possible d'adventices et pour que l'effet dure jusqu'à l'été.

La protection phytosanitaire est de type systématique. Toutes les parcelles reçoivent le même nombre de traitements (le démarrage est groupé). A chaque traitement un fongicide anti-oïdium et un fongicide anti-mildiou sont appliqués. Les règles de déclenchement des traitements sont identiques aux deux autres exploitations mais l'arrêt est plus tardif car défini par l'atteinte du stade fin véraison par le carignan. Dans les parcelles à écartement supérieur ou égal à 2 m,

les traitements sont réalisés avec le pulvérisateur pneumatique 1 inter-rang sur 2 tout au long du cycle végétatif. Dans les parcelles étroites c'est le pulvérisateur à dos qui est employé.

Concernant les autres travaux, le viticulteur débute la taille à la mi novembre et il réalise une fertilisation en sortie d'hiver.

Au bilan, les trois exploitations présentent des caractéristiques parcellaires hétérogènes, des compositions en matériel variées, une main d'oeuvre plus ou moins importante avec des disponibilités différentes. Leurs stratégies d'entretien du sol et de protection phytosanitaire définissent des conduites techniques qui semblent a priori faire peser des risques plus ou moins importants sur les ressources en eau : MG16 emploie des herbicides sur des surfaces réduites, favorise l'enherbement et possède une stratégie de protection phytosanitaire raisonnée ; à l'opposé NP06 applique des herbicides sur l'ensemble de la surface cultivée et applique une stratégie de protection phytosanitaire de type systématique ; entre les deux, NP13, favorise le travail du sol mais applique tout de même des herbicides sur une partie des inter-rangs et sa protection phytosanitaire comprend des traitements anti-mildiou systématiques.

10.2.3 La paramétrisation du modèle couplé

10.2.3.1 La paramétrisation de DHIVINE

Les structures des exploitations et leurs conduites techniques ont été paramétrées selon les informations présentées au paragraphe précédent en exploitant les différentes options offertes par le modèle DHIVINE présenté au chapitre 3.

Plans d'activités Les plans d'activités ont été définis en fonction des travaux effectués ou non par les exploitations. Par exemple, le plan d'activité de MG16 ne comprend pas de travail du sol automnal et celui de NP06 pas de broyage des sarments.

Organisation du travail L'organisation du travail repose sur l'organisation des chantiers en mode série (*Serial*) ou parallèle (*Concurrent*) et sur les valeurs des priorités des activités primitives. Ces dernières sont identiques pour les trois exploitations et sont définies en annexe C. Pour toutes les exploitations, les chantiers manuels ont été paramétrés en mode série pour représenter la réalisation d'une parcelle à la fois mais qui peut être traitée par plusieurs personnes simultanément (opérateur *max* sur l'activité) si l'opération ne consiste pas à pulvériser des pesticides. Pour MG16, tous les chantiers motorisés ont été définis en mode série (*Serial*) pour représenter la distribution des travaux entre les viticulteurs. Pour NP13 et NP06, les chantiers motorisés sont obligatoirement réalisés par eux seuls. La définition d'un mode série ou parallèle n'a donc pas de conséquence sur le déroulé des travaux, ce sont les priorités sur les activités qui vont définir l'organisation du travail. Pour les trois exploitations, l'organisation du travail est donc similaire : pour un chantier donné, les parcelles sont réalisées les unes après les autres par une seule personne et la concurrence entre les chantiers est gérée par les règles de priorité entre activités. Les différences entre exploitations, en ce qui concerne les ressources, portent donc sur le nombre et la disponibilité en main d'oeuvre.

Ressources L'exploitation NP13 est paramétrée avec un travailleur de type retraité, c'est à dire que ses horaires de travail sont réduits de deux heures par jour, qu'il ne travaille que cinq jours par semaine et que les possibilités de dépassement d'horaires sont impossibles.

L'exploitation NP06 est paramétrée avec un travailleur à temps plein possédant le calendrier de travail de chef d'exploitation : il réalise une semaine de 6 jours et ses horaires sont standards hors période de traitement phytosanitaire. Des dépassements d'horaires sont possibles. Pendant la période de traitement, les dimanches et certaines heures (entre 3 et 8h du matin) sont rendus disponibles uniquement pour la réalisation des traitements. Un travailleur manuel ayant des compétences pour la taille est ajouté. Il possède un calendrier de travail standard avec une semaine de 5 jours. En période de taille, les dépassements d'horaires ne sont pas possibles du fait de la durée du jour, ce travailleur n'en effectue donc pas.

Finalement l'exploitation MG16 est paramétrée avec deux travailleurs à temps plein dont un possède le calendrier de travail du chef d'exploitation comme présenté ci-dessus et le second le calendrier d'un travailleur standard mais avec les disponibilités particulières prévues pour la période de traitement phytosanitaire (semaine de 7 jours et horaires élargis). Un travailleur manuel ayant des compétences pour la taille est ajouté. Ces choix de paramétrisation sont liés à l'absence actuelle dans DHIVINE de définition de calendrier de travail pour les travailleurs pluriactifs. En effet, les situations de pluriactivité sont multiples avec des disponibilités et des flexibilités des travailleurs différentes. Il est donc nécessaire de prévoir des calendriers avec une paramétrisation adaptée. Au bilan, pour représenter les trois viticulteurs pluriactifs, on a donc représenté deux travailleurs à temps plein.

Gestion technique des exploitations. Pour toutes les exploitations le chantier de relevage est déclenché quand le cépage guide précoce (en terme de développement végétatif) de l'exploitation atteint le stade début de floraison et le chantier d'écimage/rognage est déclenché le 20 mai. Dans la version actuelle du modèle DHIVINE, les chantiers d'écimage ne sont pas répétés dans le temps, un seul écimage par parcelle est donc réalisé.

Le déclenchement du premier traitement phytosanitaire anti-oïdium dépend des stades phénologiques des cépages à traiter lors de ce premier traitement. Les fins des traitements dépendent du stade phénologique du cépage guide tardif de l'exploitation.

Pour l'exploitation MG16 :

Le cépage guide précoce est le chardonnay et le cépage guide tardif est le carignan.

- *le chantier de taille* : il est déclenché à la mi novembre (12 novembre) et les vignes conduites en cordon de Royat sont considérées prétaillées, leur vitesse de taille est donc plus importante ;
- *le chantier de broyage des sarments* : il est déclenché quand au moins 75% de la surface de l'exploitation est taillée ;
- *le chantier de désherbage chimique de fin d'hiver* : il est déclenché le 1er mars et réalisé avec un herbicide post-levée ;
- *les chantiers de travail du sol printanier* : ils ne peuvent commencer avant le 15 mars ; ils sont déclenchés quand la surface des parcelles, dont la couverture herbacée dans les inter-rangs entretenus par travail du sol dépasse les 20%, équivaut à au moins 75% de la surface de l'exploitation ; ils sont réalisés avec un outil à dent ; deux travaux du sol dans une parcelle sont espacés d'au moins trois semaines ; les chantiers ne peuvent avoir lieu après le 14 juillet ;
- *le chantier de désherbage chimique de printemps* : il est déclenché quand l'épamprage est terminé ; il est réalisé sur les rangs avec un herbicide de post-levée ;
- *le chantier de protection phytosanitaire* : les options sont indiquées dans le tableau 10.1 ; la cadence de traitement est de 15 jours ; des traitements anti-oïdium intercalaires (2

maximum) sont réalisés dans les parcelles de carignan (cépage très sensible à la maladie) si le bulletin d'information déclare l'observation de symptômes dans les parcelles du réseau d'observation.

Pour l'exploitation NP13 :

Le cépage guide précoce est le grenache et le cépage guide tardif est le carignan.

- *le chantier de travail du sol automnal* : il est déclenché à la mi-octobre (20 octobre), il est réalisé avec un outil à dent, il est arrêté au plus tard à la fin décembre ;
- *le chantier de taille* : il est déclenché début décembre (1er décembre) et aucune vigne n'est considérée prétaillée ;
- *le chantier de broyage des sarments* : il est déclenché dès qu'une parcelle a été taillée ;
- *le chantier de désherbage chimique de fin d'hiver* : il est déclenché quand la taille et le broyage des sarments sont terminés, il est réalisé avec une combinaison d'herbicides de pré et post-levée ;
- *le chantier de fertilisation* : il est réalisé en fin d'hiver, il est déclenché quand le broyage des sarments et le désherbage chimique sont terminés ;
- *le chantier de travail du sol de reprise* : il est déclenché quand les chantiers de broyage des sarments et de fertilisation sont terminés, il est réalisé avec un outil à dent ;
- *les chantiers de travail du sol printanier* : ils ne peuvent commencer avant le 15 mars ; ils peuvent être déclenchés de deux façons : (i) quand la surface des parcelles, dont la couverture herbacée dans les inter-rangs entretenus par travail du sol dépasse les 20%, équivaut à au moins 75% de la surface de l'exploitation, (ii) si une pluie de 30 mm ou plus est tombée (sur au moins 75% de la surface de l'exploitation) dans les dernières 24h ; ils sont réalisés avec un outil à dent ; deux travaux du sol dans une parcelle sont espacés d'au moins trois semaines ; les chantiers ne peuvent avoir lieu après le 14 juillet ;
- *le chantier de désherbage chimique de printemps* : il est déclenché le 1er juin et réalisé avec un herbicide de post-levée sur l'ensemble de la surface désherbée chimiquement (rangs et inter-rangs) ;
- *le chantier de protection phytosanitaire* : les options sont indiquées dans le tableau 10.1 ; la cadence de traitement est de 15 jours ; des traitements anti-oïdium intercalaires (2 maximum) sont réalisés dans les parcelles de carignan (cépage très sensible à la maladie) si le bulletin d'information déclare l'observation de symptômes dans les parcelles du réseau d'observation.

Pour l'exploitation NP06 :

Le cépage guide précoce est le merlot et le cépage guide tardif est le carignan.

- *le chantier de taille* : il est déclenché à la mi novembre (12 novembre) et aucune vigne n'est considérée prétaillée ;
- *le chantier de fertilisation* : il est réalisé en fin d'hiver, il est déclenché quand la taille est terminée ;
- *le chantier de désherbage chimique de fin d'hiver* : il est déclenché le 1er mars, il est réalisé avec une combinaison d'herbicides de pré et post-levée ;
- *le chantier de protection phytosanitaire* : les options sont indiquées dans le tableau 10.1 ; la cadence de traitement est de 15 jours ; des traitements anti-oïdium intercalaires (2 maximum) sont réalisés dans les parcelles de carignan (cépage très sensible à la maladie) si le bulletin d'information déclare l'observation de symptômes dans les parcelles du réseau d'observation.

Il faut noter que les variables et règles d'actions des chantiers de désherbage chimique, aussi bien de fin d'hiver que de printemps sont, à ce jour, insuffisamment développées dans DHIVINE. Il existe donc un écart plus important pour ces chantiers entre les conduites techniques décrites dans le paragraphe précédent et les paramètres d'entrée du modèle. En effet, il a été difficile d'identifier l'ensemble des indicateurs et leurs valeurs qui correspondaient aux règles de déclenchement des chantiers. Il est, par exemple, difficile de traduire les indicateurs qui permettent de représenter une organisation telle que « le chantier doit être terminé au débourement de la vigne ». Par conséquent des simplifications ont été adoptées (déclenchement sur dates, réalisation systématique de désherbage chimique de printemps alors qu'il peut être facultatif).

10.2.3.2 La paramétrisation des modèles biophysiques

Pour l'ensemble des parcelles, les mêmes paramètres pour les caractéristiques du sol ont été utilisés (humidité à saturation, humidité résiduelle,...).

Le modèle d'évolution des états de surface s'appuie sur le taux de couverture de la surface du sol par les cailloux. Par conséquent, différentes charges en cailloux ont été paramétrées pour les parcelles en fonction soit des observations de terrain pour les parcelles situées sur le bassin versant de Roujan, soit des déclarations des viticulteurs pour les parcelles en dehors du bassin versant.

Les espèces d'adventices paramétrées pour une zone donnée dépendent de la saison et des modalités d'entretien du sol comme présenté au chapitre 7. Pour l'ensemble des parcelles, on a considéré que le sol n'était ni à pH acide, ni hydromorphe et correspondait donc au troisième type de sol : « autre ».

Pour la simulation $K_{max} = 30mm/h$, $K_{min} = 10mm/h$, et $C = 2.5$ (même paramètres qu'au chapitre 7).

10.2.3.3 La simplification de certaines interactions entre modèles

Deux variables ont été fixées dans le cadre de l'application du modèle couplé (figure 10.3) :

- le potentiel hydrique de la surface du sol qui conditionne le processus de germination des plantes adventices : la valeur est fixée à $-0.088 MPa$ (même valeur que celle utilisée dans le chapitre 7). Cette simplification a été retenue car les équations de Mualem-Van Genuchten (Mualem, 1976 ; Van Genuchten, 1980) utilisées pour la conversion de l'humidité volumique au potentiel hydrique n'ont pas été calibrées et fournissent donc des valeurs qui nous semblent partiellement incohérentes. Le modèle de germination n'étant pas très sensible à la valeur du potentiel hydrique du sol (chapitre 6), on a donc choisi de le fixer.
- l'humidité volumique de la surface du sol transmise par OpenFLUID à DHIVINE pour déterminer les conditions de faisabilité des opérations : la valeur est fixée à $0.1 m^3/m^3$ (les conditions de faisabilité pour la travaillabilité et la traficabilité sont donc toujours remplies). Cette simplification a été retenue car il demeure au sein du modèle couplé des problèmes de récupération de la variable par la fonction de couplage en charge de la transférer à DHIVINE. On présentera dans les résultats une discussion de l'effet attendu de la prise en compte dans l'avenir de la dynamique de cette variable.

10.2.4 Démarche

La figure 10.3 présente le modèle couplé mis en oeuvre dans le cadre de l'application à un cas réel. Comme indiqué au chapitre précédent, on peut voir que le modèle n'inclut pas la représentation des flux de polluants et qu'il a été réalisé des simplifications comme indiquées au paragraphe précédent sur les interactions entre modèles qui concernent la teneur en eau du sol. Les variables qui sont évaluées via l'application sont identifiées par un cercle rouge : les actions culturales produites en sortie du modèle décisionnel, les variables de sorties des modèles d'évolution des états de surface du sol (couverture herbacée et états de surface du sol nu) et une des variables de pression : l'infiltrabilité du sol.

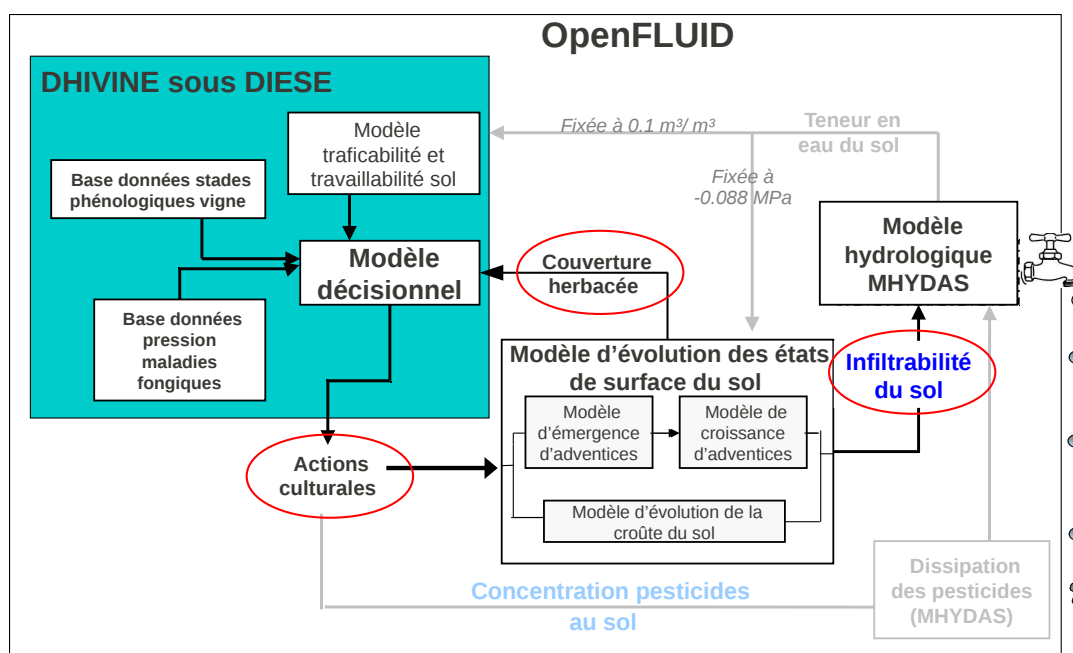


FIGURE 10.3 – Schéma conceptuel du modèle couplé mis en oeuvre pour l'application au cas réel

Les couleurs pâles indiquent que les éléments ne sont pas mis en oeuvre dans le modèle couplé. Les cercles rouges identifient les variables sur lesquelles s'effectuent le contrôle.

En terme de démarche, on procède d'abord à une analyse des calendriers culturaux des trois exploitations pour vérifier la cohérence de la modélisation décisionnelle et discuter des validations possibles. Ensuite, on présente pour chaque exploitation les résultats obtenus pour une parcelle du bassin versant de Roujan en terme d'itinéraire technique. Les dates des actions culturales simulées sont comparées, quand des données sont disponibles, aux dates déclarées par les viticulteurs.

Après la vérification des sorties du modèle décisionnel, on procède à l'étude des dynamiques de l'infiltrabilité. Pour chacune des trois parcelles, on présente pour chaque type de rangée, les états de surface du sol nu et la couverture herbacée simulée. Les résultats sont comparés à des observations réalisées à 9 dates différentes au cours de ce cycle cultural. Les courbes d'infiltrabilité de surface simulées pour chaque parcelle et chaque type de rangée sont présentées. Une discussion est proposée sur les futurs besoins de validation du modèle sur ces variables biophysiques à l'échelle du bassin versant.

Pour discuter de l'effet de l'humidité volumique de la surface du sol sur la modélisation décisionnelle, on présente la dynamique simulée de la teneur en eau du sol de surface pour une des rangées des parcelles entretenue par travail du sol. On indique les dates d'opérations de travail du sol simulées et les dates théoriquement simulées par le modèle si la variable n'était pas fixée.

Finalement, à partir de l'ensemble des résultats présentés, une discussion est réalisée sur les besoins supplémentaires en validation.

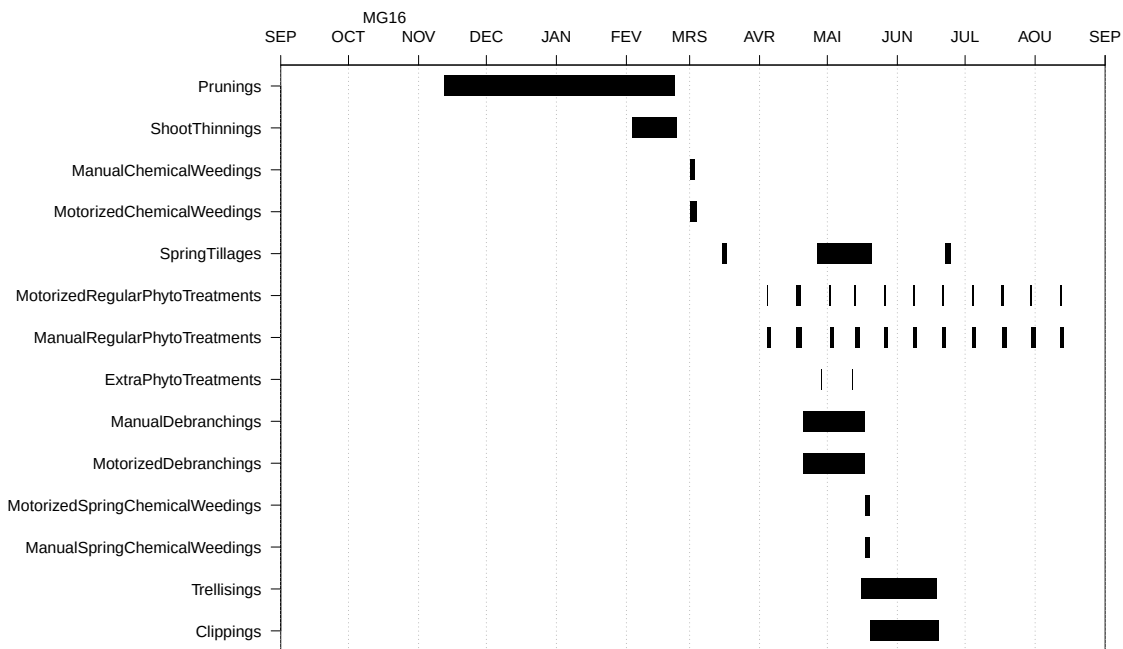


FIGURE 10.4 – Calendrier cultural simulé de l'exploitation viticole MG16 pour l'année culturale 2004-2005

Prunings = Taille; ShootThinnings = Broyage des sarments; Fertilizations = Fertilisation;
 ChemicalWeedings = Désherbage chimique; RegularPhytoTreatments = Traitements phytosanitaires réguliers (selon cadence de renouvellement); ExtraPhytoTreatments = Traitements phytosanitaires anti-oïdium intercalaires; Debranchings = Epamprage; Trellisings = Relevage; Clippings = Ecimage/Rognage; AutumnTillages = Travail du sol automnal; InitSpringTillages = Travail du sol de reprise (fin d'hiver); SpringTillages = Travail du sol printanier.

10.3 Résultats et discussion

10.3.1 Les calendriers cultureux à l'échelle de l'exploitation

Les figures 10.4, 10.5 et 10.6 présentent les calendriers cultureux simulés des trois exploitations pour l'année culturale 2004-2005. Chaque barre horizontale correspond à l'étalement temporel (date de début - date de fin) d'un chantier simulé par DHIVINE. Pour les chantiers répétés, il peut donc y avoir plusieurs barres horizontales successives.

Les différences entre les conduites techniques sont tout d'abord visibles par le nombre de chantiers modélisés pour chacune des exploitations : MG16 et NP13 réalisent respectivement 14 et 15 types de chantiers alors que NP06 n'en réalise que 9. En effet, il n'y a pas de travail du sol, ni de broyage des sarments dans cette exploitation.

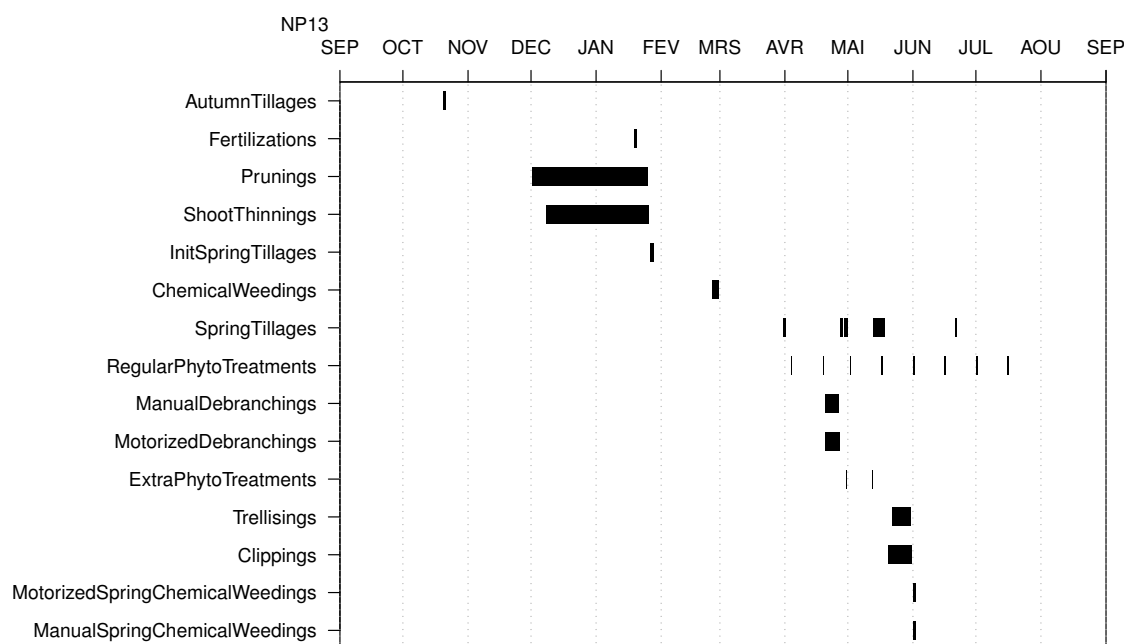


FIGURE 10.5 – Calendrier culturel simulé de l'exploitation viticole NP13 pour l'année culturale 2004-2005

Les étalements et les périodes de réalisation des chantiers sont cohérents avec la paramétrisation réalisée des conduites techniques, les contraintes en ressources des exploitations et les caractéristiques des parcellaires. Sur le chantier de taille (*Prunings*), par exemple, les dates de début correspondent bien aux règles de déclenchement paramétrées : mi novembre pour MG16 et NP06, début décembre pour NP13. L'étalement du chantier est dépendant de la surface à tailler et des ressources pour effectuer le travail. L'exploitation MG16 compte 18,3 ha à tailler avec 3 tailleurs ; l'exploitation NP13 compte 2,97 ha à tailler avec 1 tailleur et l'exploitation NP06 compte 8,86 ha à tailler avec 2 tailleurs. La durée simulée des chantiers de taille paraît donc cohérente : le chantier est le plus court chez NP13 (début décembre - fin janvier), il dure près d'un mois de plus chez NP06 (mi novembre - début février) et il est le plus long chez MG16 avec plus de 3 mois de taille (mi novembre - fin février).

Le chantier de broyage des sarments (*ShootThinnings*) illustre également les différences de conduite technique : chez MG16 il est réalisé sur la fin de la période de taille alors que

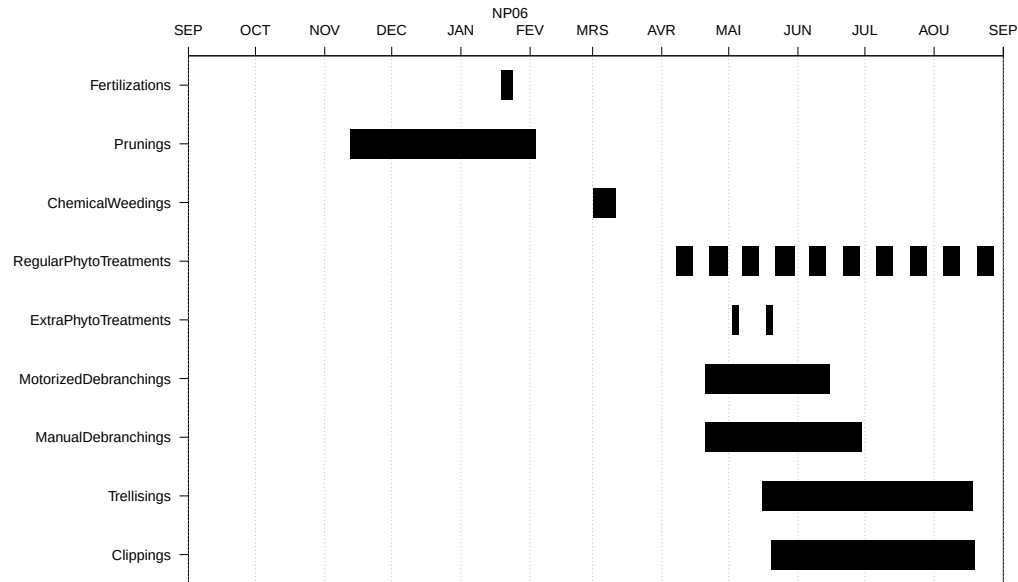


FIGURE 10.6 – Calendrier cultural simulé de l'exploitation viticole NP06 pour l'année culturale 2004-2005

chez NP13, il est réalisé au fur et à mesure. Les différences de parcellaire sont visibles au travers des chantiers de pulvérisation. L'exploitation NP06 a un parcellaire majoritairement composé de parcelles à écartements entre rangs inférieurs à 2 m. Pour ces parcelles, dans le modèle DHIVINE, on considère que la motorisation des opérations de pulvérisation n'est pas possible. Elles sont donc simulées comme étant réalisées manuellement au pulvérisateur à dos. C'est pourquoi les étalements des chantiers de pulvérisation (*ChemicalWeedings* et *PhytoTreatments*) sont beaucoup plus importantes dans l'exploitation NP06 car l'opération manuelle est plus longue à réaliser que l'opération motorisée.

Les calendriers culturaux sont donc cohérents avec la paramétrisation du modèle mais la modélisation de certains travaux doit être complétée pour mieux représenter la réalité. C'est le cas des travaux d'écimage (*Clippings*) qui ne sont réalisés qu'une seule fois alors qu'en réalité ils sont répétés 2 à 4 fois environ de fin mai à mi août.

Au delà de la vérification de la cohérence des sorties du modèle, il sera donc nécessaire de réaliser une validation des résultats à l'échelle de l'exploitation. En effet, la validation des calendriers culturaux et de l'étalement des différents travaux du cycle cultural constitue un premier niveau de contrôle pour la répartition spatio-temporelle des actions culturelles.

Il se pose alors la question des moyens de validation de ces calendriers. Certaines informations sont connues mais elles ne peuvent permettre de valider qu'une faible partie des simulations. Par exemple, MG16 et NP13 déclarent terminer la taille fin mars et NP06 à la mi avril. Ces informations montrent que les chantiers simulés ont un étalement moins importants que dans la réalité et laissent supposer soit que la taille est mal paramétrée (vitesses des opérations, horaires et jours travaillés sur la période), soit que d'autres travaux non modélisés sont réalisés à cette période. Une deuxième information disponible pour une validation à cette échelle, porte sur le nombre approximatif de travaux du sol de printemps réalisés. MG16 comme NP13 déclarent réaliser 2 à 3 chantiers de travail du sol au cours du printemps. Trois chantiers sont

simulés pour MG16 et quatre pour NP13, il semble donc qu'on surestime légèrement le nombre de travaux du sol. Ce type d'information permet donc d'estimer les améliorations possibles de la modélisation mais elles sont peu nombreuses et la collecte de données sur les calendriers culturaux est fastidieuse. Il peut alors être envisagé des validations plus complètes et précises par expertise. Des viticulteurs ou des experts de terrain peuvent évaluer la cohérence des calendriers simulés au regard de leurs connaissances et de leur expérience.

10.3.2 Les itinéraires techniques simulés sur les parcelles

Une parcelle typique de chaque exploitation est choisie ici pour illustrer les résultats obtenus en termes d'itinéraire technique et de variables biophysiques simulées. Les trois parcelles sont situées sur le bassin versant de Roujan.

La parcelle MG16_02 de l'exploitation MG16 est une parcelle de 0,94 ha encépagée en carignan avec un écartement entre rangs de 2,5 m. La surface du sol est couverte à plus de 50% par des cailloux. Elle est entretenue par alternance d'enherbement et de travail du sol 1 inter-rang sur 2. Le rang est entretenu par désherbage chimique.

La parcelle NP13_01 de l'exploitation NP13 est une parcelle de 0,57 ha encépagée en syrah avec un écartement entre rangs de 2,5 m. La surface du sol est couverte à plus de 50% par des cailloux. Elle est entretenue par alternance de désherbage chimique (1 inter-rang sur 4) et de travail du sol (3 inter-rangs sur 4). Le rang est entretenu par désherbage chimique.

La parcelle NP06_03 de l'exploitation NP06 est une parcelle de 0,78 ha encépagée en carignan avec un écartement entre rangs de 1,6 m. La surface du sol est couverte à moins de 25% par des cailloux. Elle est entretenue entièrement par désherbage chimique.

Les tableaux 10.2, 10.3 et 10.4 présentent les itinéraires techniques simulés sur les parcelles. Ils indiquent les dates et les modalités des actions culturales de travail du sol et d'application de pesticides qui influent directement sur la pollution de l'eau par les pesticides. Les dates simulées d'autres actions culturales pour lesquelles des dates ont été déclarées par les viticulteurs sont également présentées. Les dates déclarées par les viticulteurs ne sont pas exhaustives. Elles ne concernent pas les traitements phytosanitaires par exemple. De plus, certaines opérations, notamment de travail du sol, ont pu être oubliées lors de la déclaration car ces dernières sont faites de mémoire et non sur la base d'enregistrements.

10.3.2.1 La parcelle MG16_02 (tableau 10.2)

Il a été simulé 3 travaux du sol sur la parcelle et 15 applications de pesticide dont 2 d'herbicide de post-levée. En ce qui concerne les traitements phytosanitaires, on constate que la parcelle étant encépagée en carignan, elle a reçu deux traitements anti-oïdium intercalaires en plus des traitements préventifs réguliers car le bulletin d'avertissement a indiqué la présence de symptômes de la maladie dans la zone. La protection a débuté le 4 avril 2005, jour d'atteinte du stade 2-3 feuilles étalées par le carignan qui figure dans le lot de parcelles traitées dès le premier traitement. L'application d'anti-mildiou n'a débuté qu'à partir du traitement du 13 mai car les foyers primaires dans la zone ont été découverts le 3 mai. On peut d'ailleurs voir qu'à l'occasion de ce déclenchement de la protection anti-mildiou, la parcelle a reçu deux traitements anti-oïdium, deux jours de suite. Ce résultat est anormal et semble lié à une erreur d'implémentation, seul un traitement anti-mildiou aurait dû être simulé. Le dernier traitement anti-oïdium est réalisé le 30 juillet car le carignan atteint le stade début véraison le 31 juillet. Il n'est donc plus nécessaire de renouveler les traitements après cette date. Un traitement

TABLE 10.2 – Itinéraire technique simulé sur la parcelle MG16_02

Opération culturale	Date simulée	Date déclarée	Modalités de l'opération		
			Outil	Famille	Pesticide
Taille	16 au 25 nov. 04	2 mars 05	-	-	-
Broyage sarments	3 févr. 05	avr. 05	broyeur	-	-
Désherbage chimique	2 mars 05	début avr. 05	rampe horizontale	herbicide	Post-levée
Travail du sol	16 mars 05	?	outil à dent	-	-
Traitement phytosanitaire	4 avr. 05	?	lance à main	fongicide	Anti-oïdium
Traitement phytosanitaire	18 avr. 05	?	pneumatique	fongicide	Anti-oïdium
Traitement phytosanitaire intercalaire (curatif)	28 avr. 05	?	pneumatique	fongicide	Anti-oïdium
Traitement phytosanitaire	2 mai 05	?	pneumatique	fongicide	Anti-oïdium
Traitement phytosanitaire intercalaire (curatif)	12 mai 05	?	pneumatique	fongicide	Anti-oïdium
Traitement phytosanitaire	13 mai 05	?	pneumatique	fongicide	Anti-oïdium + Anti-mildiou
Travail du sol	18 mai 05	?	outil à dent	-	-
Désherbage chimique printemps	18 mai 05	?	rampe horizontale	herbicide	Post-levée
Traitement phytosanitaire	26 mai 05	?	pneumatique	fongicide	Anti-oïdium + Anti-mildiou
Traitement phytosanitaire	8 juin 05	?	pneumatique	fongicide	Anti-oïdium + Anti-mildiou
Traitement phytosanitaire	21 juin 05	?	pneumatique	fongicide	Anti-oïdium + Anti-mildiou
Travail du sol	23 juin 05	?	outil à dent	-	-
Traitement phytosanitaire	4 juil. 05	?	pneumatique	fongicide	Anti-oïdium + Anti-mildiou
Traitement phytosanitaire	17 juil. 05	?	pneumatique	fongicide	Anti-oïdium + Anti-mildiou
Traitement phytosanitaire	30 juil. 05	?	pneumatique	fongicide	Anti-oïdium + Anti-mildiou
Traitement phytosanitaire	12 août 05	?	pneumatique	fongicide	Anti-mildiou

anti-mildiou est réalisé le 12 août car l'indice de risque pour la maladie est moyen jusqu'au 16 août. En effet, dans cette situation, la conduite technique de la protection phytosanitaire définit une poursuite des traitements jusqu'à ce que l'indice de risque devienne faible.

Les dates d'opérations déclarées par le viticulteur concernent peu d'opérations. Pour les trois opérations concernées on constate un décalage conséquent des dates des travaux : la taille est simulée en novembre alors qu'elle est déclarée en mars ; le broyage des sarments est simulé début février et il est déclaré en avril ; le désherbage chimique est simulé début mars et déclaré réalisé début avril.

10.3.2.2 La parcelle NP13_01 (tableau 10.3)

Il a été simulé 6 travaux du sol sur la parcelle et 9 applications de pesticides dont 1 d'herbicides de pré-levée et post-levée et 1 d'herbicide de post-levée seul. La parcelle étant encépagée en syrah, aucun traitement anti-oïdium intercalaire n'a été réalisé. Bien que les règles de déclenchement des traitements soient identiques pour les exploitations NP13 et MG16, les traitements phytosanitaires sur la parcelle ont débuté le 19 avril car la syrah ne fait pas partie des cépages sensibles ou précoces protégés lors du premier traitement. La parcelle n'a donc été protégée qu'à partir du second traitement sur l'exploitation. Comme pour la parcelle MG16_02, on voit que la protection anti-mildiou débute une fois que les foyers primaires ont été observés, c'est-à-dire au premier traitement postérieur au 3 mai. La protection phytosanitaire s'arrête le 16 juillet quand le carignan a atteint le stade début véraison. La règle d'arrêt vaut aussi bien pour la protection anti-oïdium que pour la protection anti-mildiou.

TABLE 10.3 – Itinéraire technique simulé sur la parcelle NP13_01

Opération culturale	Date simulée	Date déclarée	Modalités de l'opération		
			Outil	Pesticide	
				Famille	Type
Travail du sol	20 oct. 04	10 sept. 04	outil à dent	-	-
Taille	01 au 08 dec. 04	20 au 29 dec. 04	-	-	-
Broyage sarments	8 déc. 04	févr. 05	broyeur	-	-
Fertilisation	19 janv. 05	4 févr. 05	épandeur	-	-
Travail du sol	27 janv. 05	?	outil à dent	-	-
Désherbage chimique	26 févr. 05	18 mars 05	rampe horizontale	herbicide	Pré-levée + Post-levée
Travail du sol	1 avr. 05	?	outil à dent	-	-
Traitement phytosanitaire	19 avr. 05	?	lance à main	fongicide	Anti-oïdium
Travail du sol	28 avr. 05	10 avr. 05	outil à dent	-	-
Traitement phytosanitaire	2 mai 05	?	pneumatique	fongicide	Anti-oïdium
Traitement phytosanitaire	17 mai 05	?	pneumatique	fongicide	Anti-oïdium + Anti-mildiou
Travail du sol	18 mai 05	30 mai 05	outil à dent	-	-
Traitement phytosanitaire	1 juin 05	?	pneumatique	fongicide	Anti-oïdium + Anti-mildiou
Désherbage chimique printemps	2 juin 05	?	rampe horizontale	herbicide	Post-levée
Travail du sol	22 juin 05	21 juin 05	outil à dent	-	-
Traitement phytosanitaire	16 juin 05	?	pneumatique	fongicide	Anti-oïdium + Anti-mildiou
Traitement phytosanitaire	1 juil. 05	?	pneumatique	fongicide	Anti-oïdium + Anti-mildiou
Traitement phytosanitaire	16 juil. 05	?	pneumatique	fongicide	Anti-oïdium + Anti-mildiou

Les dates d'opérations déclarées par le viticulteur indiquent une bonne cohérence globale de l'itinéraire technique simulé à l'exception du travail du sol automnal et du broyage des sarments.

10.3.2.3 La parcelle NP06_03 (tableau 10.4)

Il a été simulé 13 applications de pesticides dont 1 d’herbicides de pré et post-levée mélangés. Comme pour la parcelle MG16_02 des traitements anti-oïdium intercalaires ont été réalisés car la parcelle est encépagée en carignan. Les traitements ont débuté le 8 avril avec les mêmes règles de déclenchement de la protection phytosanitaire que pour les deux autres exploitations. La protection ayant une priorité très élevée, la date de traitement devrait être similaire à MG16 : le 4 avril, car c’est le jour d’atteinte du stade phénologique indicateur du déclenchement. Le décalage est lié à la durée plus importante de réalisation du traitement chez NP06 et à la réalisation prioritaire de la pulvérisation motorisée. La parcelle NP06_03 est donc protégée après les parcelles avec un écartement entre rangs large. L’application de fongicides anti-mildiou n’est simulée qu’à partir du 9 mai alors que la stratégie de protection du viticulteur est de type systématique. Par conséquent le modèle devrait simuler l’application de fongicides anti-mildiou à chaque traitement préventifs (non intercalaire). Les traitements sont arrêtés le 22 août car la règle de fin correspond à l’atteinte du stade fin véraison par le carignan qui a lieu le 03 septembre.

TABLE 10.4 – Itinéraire technique simulé sur la parcelle NP06_03

Opération culturale	Date simulée	Date déclarée	Modalités de l'opération		
			Outil	Pesticide	
				Famille	Type
Taille	22 au 26 nov. 04	début févr. 05	-	-	-
Fertilisation	19 janv. 05	?	épandeur	-	-
Désherbage chimique	3 mars 05	début avr. 05	pulvérisateur à dos	herbicide	Pré-levée + Post-levée
Traitement phytosanitaire	8 avr. 05	?	pulvérisateur à dos	fongicide	Anti-oïdium
Traitement phytosanitaire	23 avr. 05	?	pulvérisateur à dos	fongicide	Anti-oïdium
Traitement phytosanitaire intercalaire (curatif)	3 mai 05	?	pulvérisateur à dos	fongicide	Anti-oïdium
Traitement phytosanitaire	9 mai 05	?	pulvérisateur à dos	fongicide	Anti-oïdium + Anti-mildiou
Traitement phytosanitaire intercalaire (curatif)	18 mai 05	?	pulvérisateur à dos	fongicide	Anti-oïdium
Traitement phytosanitaire	24 mai 05	?	pulvérisateur à dos	fongicide	Anti-oïdium + Anti-mildiou
Traitement phytosanitaire	7 juin 05	?	pulvérisateur à dos	fongicide	Anti-oïdium + Anti-mildiou
Traitement phytosanitaire	22 juin 05	?	pulvérisateur à dos	fongicide	Anti-oïdium + Anti-mildiou
Traitement phytosanitaire	7 juil. 05	?	pulvérisateur à dos	fongicide	Anti-oïdium + Anti-mildiou
Traitement phytosanitaire	22 juil. 05	?	pulvérisateur à dos	fongicide	Anti-oïdium + Anti-mildiou
Traitement phytosanitaire	6 août 05	?	pulvérisateur à dos	fongicide	Anti-oïdium + Anti-mildiou
Traitement phytosanitaire	22 août 05	?	pulvérisateur à dos	fongicide	Anti-oïdium + Anti-mildiou

Comme pour la parcelle MG16_02, les dates d’opérations déclarées par le viticulteur concernent peu d’opérations et diffèrent des dates simulées par le modèle.

10.3.2.4 Synthèse

Les itinéraires techniques simulés pour les trois parcelles indiquent qu’il demeure des erreurs dans l’implémentation du modèle décisionnel qui conduisent à des incohérences sur les simulations de traitements phytosanitaires (traitement mal positionné ou avec des erreurs concernant les types de fongicides appliqués). Cependant, la vérification s’avère majoritairement positive.

Les dates d’opérations déclarées par les viticulteurs sont insuffisamment nombreuses pour procéder à une réelle validation des simulations. Elles indiquent certains décalages mais qui pour des opérations comme la taille ou le broyage des sarments peuvent être liés à des dif-

férences d'ordre de réalisation entre les parcelles à l'échelle de l'exploitation. De plus, pour ces opérations, les différences de dates à l'échelle de la parcelle n'ont aucune conséquence sur la simulation de la qualité de l'eau à l'échelle du bassin versant. En effet, ces actions influencent le positionnement temporel et spatial des chantiers d'entretien du sol sur les parcelles à l'échelle de l'exploitation mais ne modifient pas directement la pression globale que fait subir l'exploitation au milieu. Par rapport aux objectifs de notre travail c'est donc d'abord à l'échelle de l'exploitation que les dates de ces actions doivent être validées, l'analyse à l'échelle de chaque parcelle devant plutôt porter sur la vérification de la cohérence des itinéraires techniques simulés. En ce qui concerne les décalages observés entre les dates de désherbage chimique simulées et observées pour les parcelles MG06_02 et NP06_03, elles confirment le manque de développement de ces chantiers dans le modèle DHIVINE. La simplification de la règle de déclenchement du chantier par une date ne permet pas de représenter de manière réaliste la répartition temporelle du désherbage chimique sur les parcelles. On constate que quand la règle de déclenchement du chantier de désherbage chimique s'appuie sur une règle d'enchaînement comme pour l'exploitation NP13, la simulation fournit une date plus réaliste. En effet, l'implémentation de la règle de déclenchement du chantier dans le modèle est peu ou pas simplifiée par rapport à la règle de déclenchement déclarée par le viticulteur.

On va dans le paragraphe suivant présenter la dynamique de l'infiltrabilité pour les différents types de rangées des trois parcelles en fonction des actions d'entretien du sol simulées. Des données d'observations des états de surface des parcelles permettront de réaliser une évaluation des simulations.

10.3.3 Les dynamiques simulées de l'infiltrabilité du sol à l'échelle de la rangée

Les figures 10.7, 10.8 et 10.9 présentent pour chaque type de rangée de chacune des parcelles déjà prise en exemple (i) l'évolution des états de surface du sol nu et de la couverture herbacée, (ii) la dynamique de l'infiltrabilité. Les triangles inversés indiquent les états de surface sur sol nu observés. Les croix indiquent les taux de couverture herbacée observés. La barre verticale donne l'intervalle dans lequel se trouve le taux de couverture (e.g. 0-25%).

10.3.3.1 La parcelle MG16_02 (figure 10.7)

Concernant l'inter-rang enherbé, aucune intervention n'est simulée, l'état de surface sur sol nu est fixée à Cst et le taux de couverture herbacée est normalement fixé à 100%. On constate une erreur à l'initialisation de l'état de surface sur sol nu (initialisé à T). De plus, il y a une période entre avril et juillet durant laquelle le taux de couverture herbacée est ramené à 0. Ceci est lié à des erreurs résiduelles dans l'implémentation du modèle qui seront à corriger. Par conséquent l'infiltrabilité simulée pour ce type de rangée devrait théoriquement être stable.

Les états de surface du sol nu observés sont similaires à ceux simulés. Par contre le taux de couverture herbacée observé est systématiquement inférieur au taux de couverture simulé. Tant que celui-ci n'est pas inférieur à 50%, l'infiltrabilité est considérée identique (Andrieux et al., 2001). Cependant, ceci n'est vrai qu'entre avril et juillet, le reste de l'année, les taux observés sont inférieurs à 50%. Ceci peut être lié au choix effectué par l'exploitant d'alterner d'une année sur l'autre entre enherbement et travail du sol sur un même inter-rang. Ainsi l'enherbement est en phase d'installation durant la période hivernale et ne peut donc atteindre directement 100% comme considéré dans la simulation.

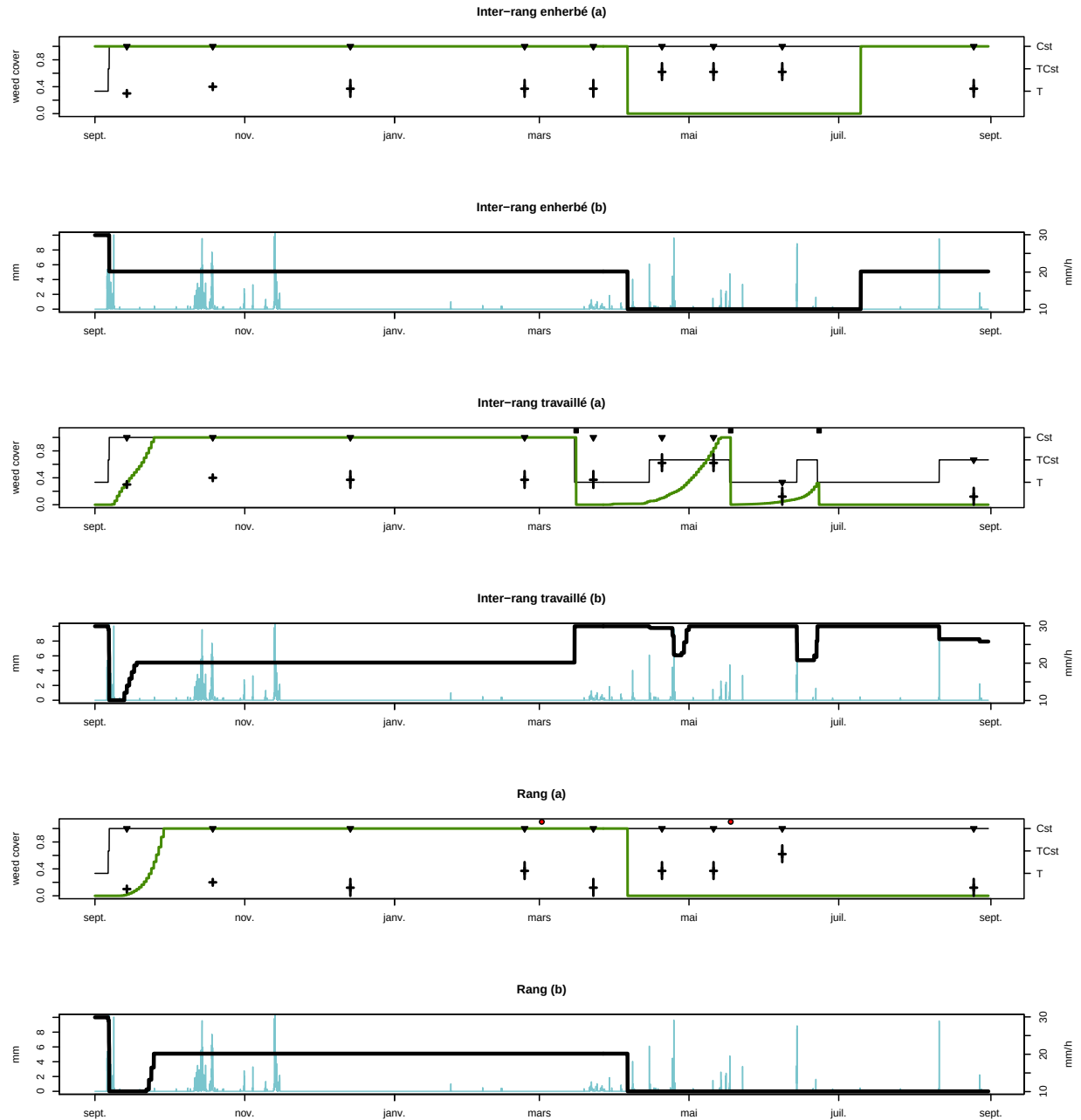


FIGURE 10.7 – Evolution de la couverture herbacée (courbe verte), des états de surface sur sols nus (courbe noire) et de l'infiltrabilité (courbe noire grasse) modélisée pour les trois types de rangées de la parcelle MG16_02

Pour chaque type de rangée, le graphe supérieur (a) présente la dynamique du couvert herbacé (%) et des états de surface sur sols nus; le graphe inférieur (b) présente l'infiltrabilité modélisée (mm/h) et la pluie (mm). Les carrés noirs représentent les occurrences du travail du sol et les points rouges ceux du désherbage chimique. Les triangles inversés indiquent les états de surface sur sol nu observés. Les croix indiquent les taux de couverture herbacée observés. La barre verticale donne l'intervalle dans lequel se trouve le taux de couverture (e.g. 0-25%).

Concernant l'inter-rang travaillé, trois travaux du sol sont réalisés entre mars et juillet. Ils sont déclenchés à partir du 15 mars quand le taux de couverture herbacée dépasse les 20% sur une majorité des parcelles de l'exploitation.

On constate tout d'abord que l'absence de travail du sol en période automnale et hivernale conduit à la simulation d'une couverture herbacée totale du sol à cette période. Puis les travaux du sol de printemps créent des cycles de « destruction-repousse ». Après le dernier travail du sol, le couvert herbacé reste nul. Ceci est lié à la date de ce dernier travail du sol qui est postérieure à la date d'arrêt de la germination pour cause d'entrée en dormance des graines des plantes adventices.

Sur la période automnale-hivernale, il existe une bonne cohérence entre les données observées et simulées. Certes, le taux de couverture herbacée est surestimé mais le taux observé est d'environ 40%. De plus les états de surface sur sol nu sont correctement simulés. Par conséquent la différence entre infiltrabilité simulée et réelle est faible puisqu'au-delà de 50% de couverture herbacée du sol pour le même état de surface sur sol nu, la valeur simulée demeure stable.

Pour la période de début de printemps (début mars à mi mai), les différences entre observations et simulations sont plus importantes. Les états de surface sur sols nus observés sont plus évolués que ceux simulés et la couverture herbacée observée est plus importante que celle simulée. Cela semble indiquer que le travail du sol de mi mars simulé n'a probablement pas eu lieu en réalité. L'infiltrabilité du sol simulée est donc surestimée sur cette période.

À partir de mi-mai, les observations et les simulations redeviennent cohérentes. Les valeurs observées correspondent bien aux valeurs simulées. On peut donc supposer que la dynamique de l'infiltrabilité est cohérente.

Concernant le rang, deux désherbages chimiques avec des herbicides de post-levée sont simulés début mars et fin mai. En l'absence d'intervention automnale et hivernale, le taux de couverture herbacée simulé est maximal pendant cette période. Il est ramené à zéro, une fois que l'herbicide appliqué début mars a détruit le couvert. Cependant on constate qu'il n'y a pas de reprise de la croissance alors que l'herbicide de post-levée ne l'empêche pas théoriquement, le couvert herbacé simulé reste nul. Cette observation semble liée à une erreur dans le modèle.

Les données observées montrent que le développement du couvert herbacé est fortement surestimé par le modèle pour la période automnale-hivernale. Ceci peut être lié à la densité de plantes modélisée. En effet, sur les surfaces régulièrement désherbées chimiquement (notamment avec des herbicides de pré-levée) et non travaillées, le stock de graines est réduit. La densité de plantes adventices est donc plus faible que sur les surfaces travaillées et ne permet pas d'atteindre une couverture totale du sol même quand les plantes réalisent un développement complet. Une calibration de la densité pour cette modalité d'entretien du sol pourrait donc permettre d'obtenir des simulations plus cohérentes.

Au cours du printemps, si on suppose qu'une reprise de la croissance devrait être simulée, les données observées devraient être cohérentes avec les données simulées. Au bilan, l'infiltrabilité sur le rang est surestimée par le modèle en période hivernale et elle est actuellement sous-estimée en période printanière.

En conclusion pour la parcelle MG16_02 :

- Sur l'inter-rang enherbé, l'infiltrabilité est sous-estimée au printemps du fait d'une erreur dans le modèle. Elle est sur-estimée le reste du cycle du fait des pratiques d'alternance des inter-rangs enherbés et travaillés du viticulteur. Il faudra donc à l'avenir effectuer des comparaisons similaires pour des inter-rangs enherbés de manière permanente plusieurs années de suite.

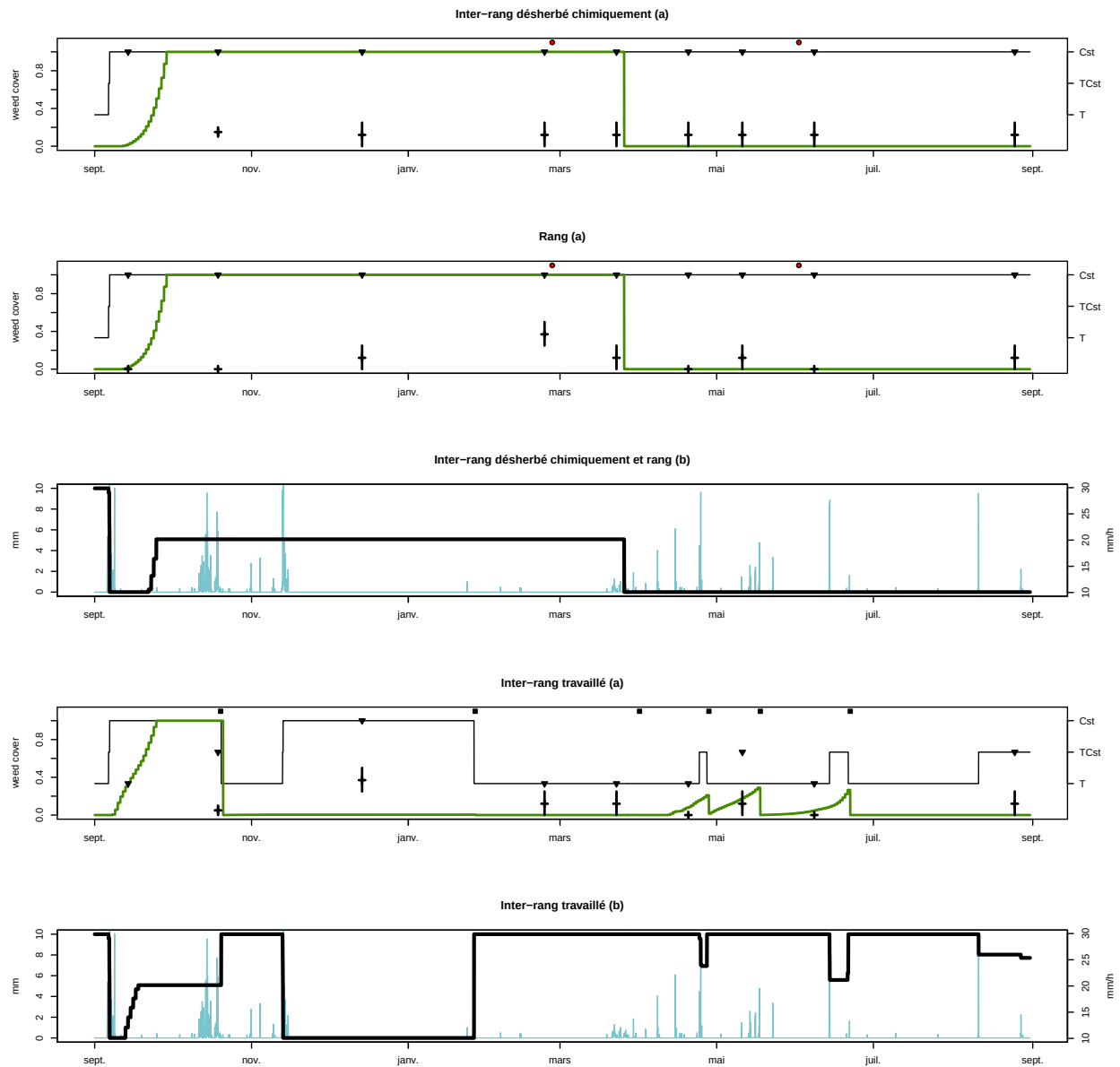


FIGURE 10.8 – Evolution de la couverture herbacée (courbe verte), des états de surface sur sols nus (courbe noire) et de l'infiltrabilité (courbe noire grasse) modélisée pour les trois types de rangées de la parcelle NP13_01

Pour chaque type de rangée, le graphe (a) présente la dynamique du couvert herbacé (%) et des états de surface sur sols nus; le graphe (b) présente l'infiltrabilité modélisée (mm/h) et la pluie (mm). Les carrés noirs représentent les occurrences du travail du sol et les points rouges ceux du désherbage chimique.

Les triangles inversés indiquent les états de surface sur sol nu observés. Les croix indiquent les taux de couverture herbacée observés. La barre verticale donne l'intervalle dans lequel se trouve le taux de couverture (e.g. 0-25%).

- Sur l’inter-rang travaillé, l’infiltrabilité du sol simulée semble globalement cohérente avec les observations d’états de surface, toutefois, un travail du sol de plus est simulé au printemps qui conduit à une sur-estimation de l’infiltrabilité durant 2 mois.
- Sur le rang, l’infiltrabilité simulée est peu cohérente avec les observations d’états de surface : elle est sur-estimée en hiver du fait d’une sur-estimation de la densité de graines modélisée et sous-estimée au printemps du fait d’une erreur dans le modèle.

10.3.3.2 La parcelle NP13_01 (figure 10.8)

Les simulations sont identiques pour l’inter-rang désherbé chimiquement et pour le rang mais les observations d’états de surface sont légèrement différentes, on les présente donc dans deux graphes séparés. La dynamique de l’infiltrabilité du sol simulée est commune et présentée par un seul graphe.

Sur les surfaces désherbées chimiquement, un premier désherbage chimique avec une combinaison d’herbicides de pré et de post-levée est réalisé fin février puis un second désherbage chimique est réalisé début juin avec un herbicide de post-levée. La simulation est similaire à celle du rang de la parcelle MG16_02 mais ici l’absence de repousse consécutive au premier désherbage chimique est cohérente avec les interventions simulées du fait de la rémanence de l’herbicide de pré-levée et d’une application complémentaire d’herbicide de post-levée.

Les états de surface du sol nu observés sont identiques à ceux simulés. Cependant, la couverture herbacée du sol et donc l’infiltrabilité du sol, sur le rang comme sur l’inter-rang, est largement surestimée par le modèle en période hivernale comme pour la parcelle MG16_02.

En période printanière et estivale, les simulations sont plus proches des observations. L’infiltrabilité du sol est minimale. Toutefois, le second désherbage chimique est réalisé sur un sol nu, ce qui n’est pas cohérent puisque c’est un herbicide de post-levée qui est appliqué. Les règles de déclenchement de l’opération seront donc à adapter pour prendre en compte le développement de la couverture herbacée. En effet, si cela n’a pas de conséquence a priori sur l’infiltrabilité, il peut en y avoir pour la concentration en matières actives au sol.

Concernant l’inter-rang travaillé, six travaux du sol sont effectués tout au long du cycle cultural. Le travail du sol automnal détruit le couvert qui ne repousse pas ensuite avant le printemps. L’absence de repousse est liée à l’espèce modélisée (*Diplotaxis erucoides*) et aux températures de la période, trop faibles pour permettre la simulation de son développement (chapitre 6). A partir de janvier deux travaux du sol sont effectués sans considération du couvert herbacé : le travail du sol de reprise (fin janvier) dont le déclenchement répond à des règles d’enchaînement entre travaux et le premier travail du sol de printemps (début avril) déclenché sur la pluviométrie. L’absence de croissance du couvert entre ces deux travaux du sol est lié aux faibles températures des mois de février et mars et l’absence d’évolution de l’état de surface du sol nu est lié aux faibles pluies. Les trois travaux du sol qui suivent sont déclenchés par le taux de couverture herbacée sur les parcelles de l’exploitation. Comme pour la parcelle MG16_02, le dernier travail du sol a lieu après l’entrée en dormance des graines, le couvert est donc absent en période estivale. Le nombre important de travaux du sol simulés sur cette rangée conduit à un développement limité du couvert herbacé simulé pour tout le cycle cultural.

Les états de surface observés indiquent que la simulation globale est correcte : il y a peu de différences entre les observations et les simulations aussi bien pour les états de surface du sol nu que pour les taux de couverture herbacée. On observe seulement une sous-estimation du couvert herbacé hivernal.

En conclusion pour la parcelle NP13_01 :

- Sur les surfaces dés herbées chimiquement, l'infiltrabilité simulée est peu cohérente en période hivernale avec les observations d'états de surface : elle est sur-estimée du fait d'une surestimation de la densité de graines modélisée.
- Sur les surfaces travaillées, l'infiltrabilité du sol simulée est en bonne cohérence globale avec les observations d'états de surface.

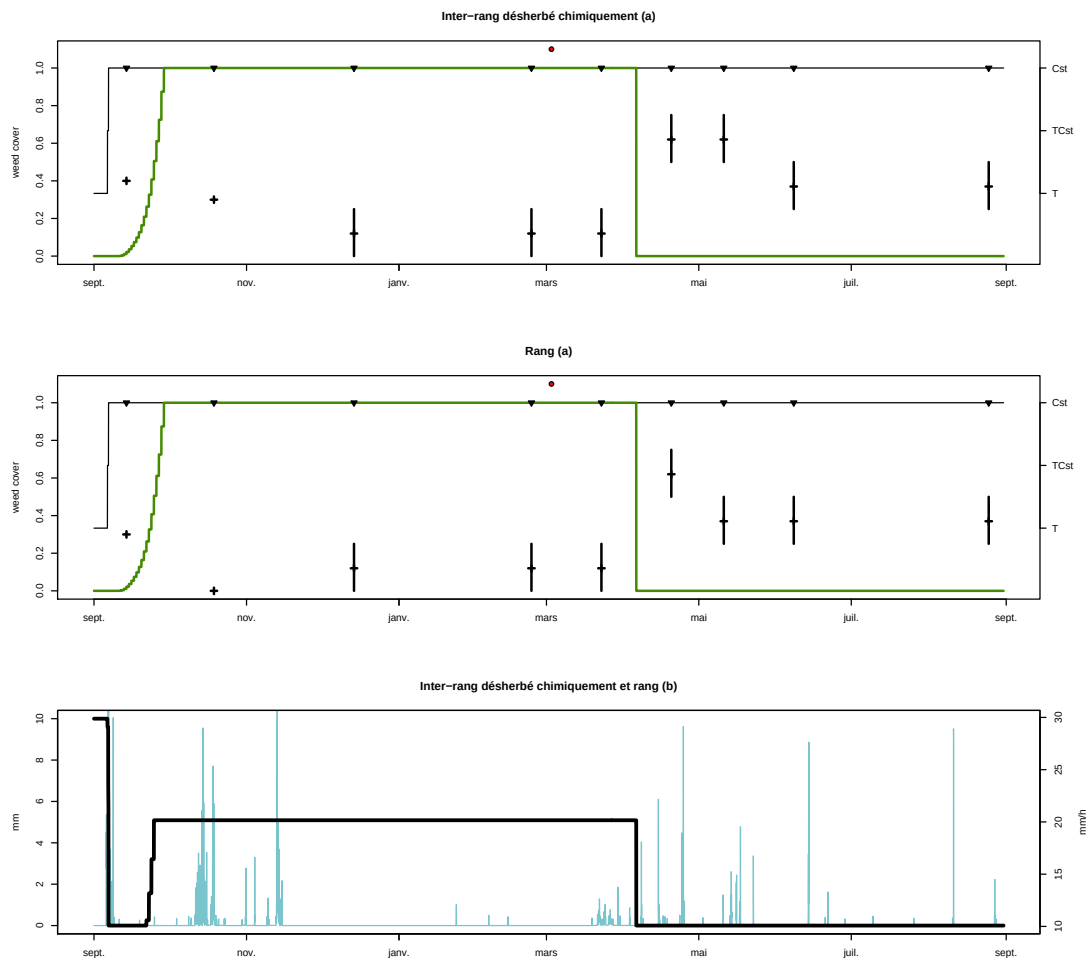


FIGURE 10.9 – Evolution de la couverture herbacée (courbe verte), des états de surface sur sols nus (courbe noire) et de l'infiltrabilité (courbe noire grasse) modélisée pour les deux types de rangées de la parcelle NP06_03

Pour chaque type de rangée, le graphe (a) présente la dynamique du couvert herbacé (%) et des états de surface sur sols nus; le graphe (b) présente l'infiltrabilité modélisée (mm/h) et la pluie (mm). Les carrés noirs représentent les occurrences du travail du sol et les points rouges ceux du désherbage chimique.

Les triangles inversés indiquent les états de surface sur sol nu observés. Les croix indiquent les taux de couverture herbacée observés. La barre verticale donne l'intervalle dans lequel se trouve le taux de couverture (e.g. 0-25%).

10.3.3.3 La parcelle NP06_03 (figure 10.9)

Comme pour la parcelle NP13_01, les simulations sont identiques pour l'inter-rang désherbé chimiquement et pour le rang mais les observations d'états de surface sont légèrement différentes, on les présente donc aussi dans deux graphes séparés. La dynamique de l'infiltrabilité du sol simulée est commune et présentée par un seul graphe.

Dans cette parcelle, la seule intervention d'entretien du sol simulée est un désherbage chimique avec une combinaison d'herbicides de pré et post-levée début mars. Les variables simulées ont des dynamiques identiques à celles de la partie désherbée chimiquement de la parcelle NP13_01. On observe comme pour les parcelles précédentes, une surestimation du couvert herbacé hivernal. De plus, on observe une sous-estimation printanière du couvert. Les observations indiquent que le couvert se développe à partir d'avril puis diminue en juin. Ces données sont cohérentes avec la déclaration par le viticulteur d'une réalisation du désherbage chimique en avril. L'avancement de la date de désherbage chimique simulé par rapport à la date réalisée conduit donc à une mauvaise simulation de l'infiltrabilité du sol en période printanière.

En conclusion, l'infiltrabilité simulée est peu cohérente avec les observations d'états de surface : elle est sur-estimée en hiver du fait d'une surestimation de la densité de graines modélisée et sous-estimée au printemps du fait d'une date simulée de désherbage chimique trop avancée.

10.3.3.4 Synthèse

La comparaison des états de surface du sol simulés aux états de surface observés nous a permis d'évaluer les simulations produites à l'échelle des rangées de trois parcelles. On dresse un bilan des résultats obtenus par modalité d'entretien du sol.

- Pour l'entretien par enherbement permanent, le cas étudié était un cas particulier représentatif de la première année d'installation de l'enherbement. Dans ce cas, l'infiltrabilité est globalement sur-estimée en période hivernale. Une sous-estimation printanière de l'infiltrabilité du sol est liée à une erreur dans la version actuelle du modèle.
- Pour l'entretien par travail du sol, deux rangées de deux parcelles ont été étudiées. Dans les deux cas, les simulations sont globalement en accord avec les données observées. Toutefois, la simulation du couvert herbacé pour la période hivernale devrait être améliorée : en l'absence de travail du sol automnal, elle est sur-estimée et en cas de réalisation de travail du sol automnal, elle est sous-estimée. Finalement, l'ouverture de la période de travail du sol printanier au 15 mars a conduit pour une des rangées à un travail du sol précoce surnuméraire. Il serait donc nécessaire de définir différentes modalités pour l'ouverture de cette période de travail du sol et en rechercher les déterminants pour les viticulteurs.
- Pour le désherbage chimique, on constate des décalages importants entre les états de surface du sol observés et ceux simulés. La couverture herbacée et donc l'infiltrabilité du sol, est systématiquement sur-estimée en période hivernale. En période printanière, si la date simulée d'application d'herbicide est correcte, le modèle fournit des valeurs d'infiltrabilité cohérentes. Cependant, on a évoqué lors de l'étude des itinéraires techniques des parcelles, des insuffisances de développement de la modélisation du désherbage chimique qui peuvent conduire, en fonction des options de conduite technique, à des dates simulées incorrectes. Dans ces cas là, les erreurs sur les dates provoquent des erreurs de simulation de l'infiltrabilité. Finalement, une erreur dans la version actuelle du modèle ne permet

pas de représenter le développement du couvert herbacé postérieur à l'application d'un herbicide de post-levée, ce qui peut conduire à des sous-estimations de l'infiltrabilité du sol.

L'étude des cas particuliers à l'échelle de la rangée a permis de détecter certaines incohérences de la modélisation et d'en identifier les origines pour permettre de futures améliorations. Cependant elle ne permet pas réellement de conclure sur la qualité de la représentation spatio-temporelle de l'infiltrabilité par le modèle à l'échelle d'un bassin versant. En effet, il est possible d'obtenir une distribution spatiale et une dynamique cohérente de l'infiltrabilité à l'échelle du bassin, ce qui est l'objectif majeur de l'approche de modélisation mise en place, sans pour autant qu'elle le soit à l'échelle de chaque rangée qui le compose. Il faudrait donc procéder à des contrôles des simulations à cette échelle en appliquant le modèle à un plus grand nombre d'exploitations. Les observations d'états de surface constituent des variables de contrôle intéressantes pour une telle étude car elles sont disponibles à différents moments du cycle cultural et pour l'ensemble des parcelles du bassin versant. Elles peuvent donc permettre une validation globale. Des contrôles plus spécifiques par modalités d'entretien du sol peuvent également être envisagés.

10.3.4 Discussion sur l'effet d'une simplification opérée dans l'application du modèle

Pour l'application du modèle couplé, on a fixé l'humidité volumique de la surface du sol transmise par OpenFLUID à DHIVINE qui détermine les conditions de faisabilité des opérations (10.2.3.3). On discute ici de l'effet sur les simulations de cette simplification en étudiant le cas de la rangée entretenue par travail du sol de la parcelle NP13_01. On étudie les décalages temporels potentiels pour les actions de travail du sol car ce sont les actions les plus exigeantes vis à vis de l'humidité du sol (chapitre 7). Cette parcelle a été choisie car les travaux du sol sont nombreux et étalés sur l'année.

La figure 10.10 présente l'évolution de l'humidité volumique de la surface du sol simulée par OpenFLUID pour la rangée travaillée de la parcelle NP13_01. Les lignes horizontales indiquent les seuils de travaillabilité en situation de routine (0.14) et en situation d'urgence (0.19). Les carrés rouges correspondent aux dates simulées de travail du sol. Les triangles inversés correspondent aux dates que le modèle décisionnel DHIVINE aurait théoriquement simulé si l'humidité volumique transmise par OpenFLUID n'avait pas été fixée et si le seuil défini pour la travaillabilité était le seuil d'urgence.

En ce qui concerne le travail du sol automnal, la date simulée (20 octobre) se situe juste après des événements pluvieux importants. Par conséquent, la teneur en eau du sol est importante et ne permettrait pas théoriquement un travail du sol. Celui-ci aurait dû être repoussé au 22 novembre. Dans ce cas, la couverture herbacée du sol, développée au cours du mois de septembre, aurait perduré plus longtemps. L'infiltrabilité aurait également conservé un niveau plus élevé pendant un mois supplémentaire.

La teneur en eau du sol lors du travail du sol de reprise réalisé fin janvier est inférieure au seuil de travaillabilité de routine. Les dates simulées avec la teneur en eau fixe choisie et une teneur en eau variable ne diffèrent donc pas.

Au printemps, quatre travaux du sol sont simulés avec la simplification du modèle. On peut voir que trois seulement l'auraient été sans la simplification. En effet, le premier travail du sol du 1er avril est réalisé dans une période pour laquelle le seuil de travaillabilité est

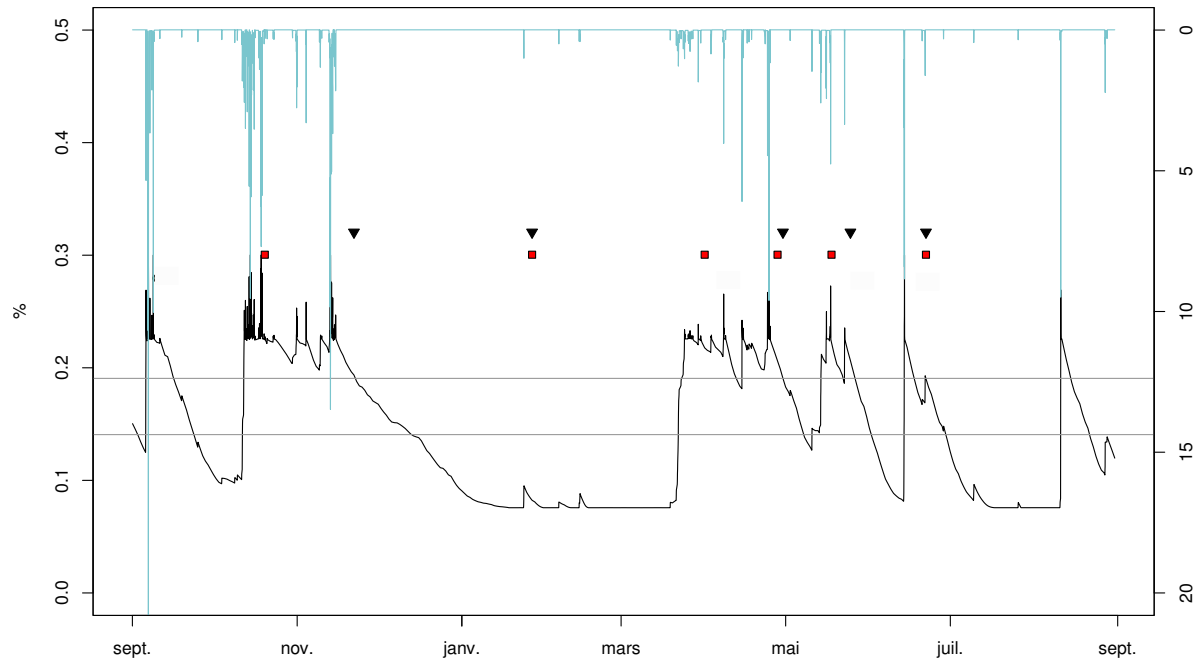


FIGURE 10.10 – Dynamique de l’humidité volumique de la surface du sol (%) de la rangée entretenue par travail du sol de la parcelle NP13_01, dates de travail du sol simulées et pluviométrie (mm).

dépassé. Il aurait donc dû être simulé plutôt au 30 avril, au moment de la simulation du second travail du sol. Par ce décalage, seules trois interventions auraient donc théoriquement été simulées approximativement aux dates des second, troisième et quatrième travaux du sol réellement simulés. Au bilan, évaluer les différences en terme d’infiltrabilité revient à évaluer les différences créées par l’absence du travail du sol début avril. Si ce dernier n’avait pas été simulé, l’état de surface du sol nu aurait évolué et l’infiltrabilité aurait donc été diminuée. L’absence de croissance de l’herbe à cette période n’est pas due à l’opération culturale mais au froid, il n’y aurait donc pas eu de changement pour cette variable.

En conclusion, la non prise en compte de la dynamique de la teneur en eau du sol par le modèle décisionnel peut conduire à des décalages d’un mois des dates de travail du sol voire à un nombre différent d’interventions. En l’occurrence, on avait signalé une simulation de travaux du sol trop nombreux au printemps, l’intégration des conditions de faisabilité permettraient de simuler le bon nombre d’interventions. Le décalage théorique des dates peut ainsi conduire à un décalage de la dynamique simulée de l’infiltrabilité du sol. Le modèle couplé est donc sensible à cette variable échangée entre deux sous-modèles.

10.3.5 Les futurs besoins de validation du modèle couplé

La présentation des résultats obtenus pour l’application du modèle couplé à trois exploitations a permis d’évoquer les besoins en validation et les possibilités de validation en ce qui concerne (i) les déroulés d’actions culturales produits par le modèle décisionnel DHIVINE et (ii) la dynamique de l’infiltrabilité de surface du sol.

D’autres variables de sorties du modèle couplé ou des sous-modèles devront être évaluées dans le cadre d’une validation plus complète. Tout d’abord la seconde variable de pres-

sion clef : la concentration en matières actives au sol. En effet, c'est par la représentation spatio-temporelle de cette variable que l'on cherche à représenter les impacts hydrologiques des pratiques culturales. Il paraît donc nécessaire de valider les simulations de sa distribution spatiale et de sa dynamique à l'échelle du bassin versant comme pour l'infiltrabilité. Toutefois, il n'existe pas actuellement de mesure au cours du temps des concentrations en pesticides au sol distribuées spatialement sur le bassin versant. Cette validation ne peut donc reposer que sur les dates d'applications de pesticides déclarées par les viticulteurs qui sont en nombre réduit et souvent approximatives.

Une validation sur les variables de sortie du modèle hydrologique devra également être réalisée. Cette validation synthétique des flux d'eau et de polluants à l'exutoire permettra de valider les sorties qui constituent le diagnostic que doit porter le modèle quant à l'impact des pratiques agricoles sur la pollution de l'eau par les pesticides. Elle est rendue possible grâce aux bases de données de l'ORE OMERE.

10.4 Conclusion

L'application du modèle couplé à un cas réel a permis de réaliser différents contrôles à différents niveaux du modèle et de passer en revue les besoins en validation.

Les résultats obtenus montrent que l'approche déterministe de modélisation décisionnelle précise des conduites techniques permet d'obtenir des représentations réalistes des itinéraires techniques aussi bien à l'échelle de l'exploitation qu'à l'échelle de la parcelle même si certaines erreurs dans le modèle restent à corriger. On a d'ailleurs pu constater que si les règles et variables pour l'action sont insuffisamment modélisées, les résultats sont de moindre qualité (c'est le cas par exemple pour le désherbage chimique). Par ailleurs, à l'échelle de la parcelle, on a pu voir que la dynamique de l'infiltrabilité du sol simulée est largement dépendante de l'ensemble de la chaîne de modélisation qui la produit. En effet, elle est fortement liée aux calendriers des actions culturales eux-mêmes modifiés par le biais d'interactions avec des processus biophysiques comme la croissance de l'herbe ou l'évolution de la teneur en eau du sol. Sa bonne représentation globale est liée à la qualité des résultats des modèles en amont. Il sera donc nécessaire d'améliorer la modélisation de la dynamique de la couverture herbacée (particulièrement pour les parcelles désherbées chimiquement) et d'intégrer dans le modèle l'interaction entre le modèle hydrologique MHYDAS et le modèle décisionnel DHIVINE sur la teneur en eau du sol. Au bilan, à l'échelle de l'exploitation, la démarche de modélisation mise en oeuvre semble pouvoir fournir des résultats cohérents qui pourraient alors, dans le cas de simulation de cas réel, constituer des bases d'échanges avec les agriculteurs, particulièrement pour améliorer la modélisation de leurs conduites techniques.

Le modèle ayant pour objectif d'évaluer les impacts des pratiques culturales à l'échelle de bassin versant, on peut supposer qu'une bonne modélisation de la pression des pratiques culturales à la parcelle devrait permettre d'obtenir une représentation correcte de la pression à l'échelle du bassin versant. Cependant, le contrôle de la répartition spatio-temporelle des variables de pression demeure à réaliser pour vérifier cette hypothèse, trois parcelles seulement ayant été contrôlées ici dans le cadre de l'application du modèle. L'utilisation des données d'observations des états de surface des sols peut permettre une validation de la distribution de l'infiltrabilité du sol. Les données pour le contrôle de la concentration en pesticides au sol sont, quant à elles, peu nombreuses et difficiles à obtenir. Une autre voie complémentaire de validation du modèle couplé à l'échelle du bassin versant est celle de la validation sur les flux d'eau et de polluants. Cette phase de validation nécessaire devra cependant être précédée

d'une phase de paramétrisation et de calage du modèle hydrologique pour son utilisation dans le cadre du modèle couplé.

Remerciements

Je remercie David Fages pour la réalisation des enquêtes auprès des viticulteurs de Roujan ainsi que ces derniers. Merci à Jean-Pierre Rellier et Jean-Christophe Fabre pour le travail de réglage des modèles et du couplage qui a permis d'aboutir à ces résultats. Merci à François Garnier pour les enquêtes sur les pratiques culturales sur les parcelles de Roujan. Merci à tous ceux qui ont participé aux relevés d'états de surface utilisés dans ce travail : François Garnier, Gwenn Trotoux et Patrick Andrieux. Merci à Laurent Prévot pour la figure 10.1. Merci à Michael Rabotin pour la figure 10.2.