

Conclusion générale et perspectives

Sommaire

11.1 Les principaux résultats	288
11.1.1 DHIVINE, un modèle décisionnel sur les systèmes de culture viticoles pour la représentation des calendriers d'actions culturales à l'échelle de bassins versants	288
11.1.2 Une modélisation de la dynamique de l'infiltrabilité du sol via la modélisation de l'évolution des états de surface du sol	289
11.1.3 Les indicateurs pour la décision : entre modélisation biophysique et détermination de seuils	291
11.1.4 Le couplage de modèles pour la représentation du fonctionnement d'agro-écosystème : des choix pour rendre compatible les différentes échelles spatiales et temporelles	292
11.1.5 Le modèle couplé DHIVINE - MHYDAS, de la structure théorique à l'application pratique : premiers éléments d'évaluation du modèle	294
11.2 Les perspectives	295

Conclusion générale et perspectives

L'objectif du travail de thèse était de développer une démarche de modélisation couplée des pressions agricoles et des impacts consécutifs pour l'évaluation des effets sur la contamination de l'eau par les pesticides dans le cadre des pratiques culturales mises en oeuvre en milieu viticole languedocien. En effet, la pression des systèmes de culture est exercée via les actions culturales dépendantes des conduites techniques des exploitations. Les impacts environnementaux résultent alors du fonctionnement biophysique du milieu en interaction avec l'organisation des systèmes de culture. On a donc cherché à produire un modèle de fonctionnement global de l'agro-écosystème qui prenne en compte la dynamique des variables d'état du milieu modifiées par les actions culturales.

La démarche générale de modélisation a été composée de 4 étapes : (i) l'analyse de l'ensemble des processus de l'agro-écosystème pour définir un modèle conceptuel de fonctionnement adapté à la problématique étudiée, (ii) la modélisation des processus, (iii) le couplage des modèles, (iv) l'application et le contrôle du modèle couplé produit.

Dans le cadre de la problématique de la pollution de l'eau par les pesticides, deux variables d'état du milieu modifiées par les actions anthropiques jouent un rôle primordial sur les impacts hydrologiques des pratiques culturales. Ce sont *l'infiltrabilité de la surface du sol et la concentration en matières actives au sol*. Le modèle conceptuel sur lequel s'est basé le travail de thèse et présenté à la figure 10.11 a donc été dessiné autour de ces deux variables de couplage entre le modèle décisionnel et le modèle hydrologique.

Compte tenu de l'utilisation du modèle hydrologique MHYDAS déjà existant qui comprend la modélisation des processus d'évolution de la concentration en pesticides au sol, le travail de thèse s'est articulé autour de trois grandes parties :

1. *Une première partie de modélisation décisionnelle* qui concerne la modélisation des processus de gestion technique des exploitations via le développement du modèle DHIVINE (chapitres 2 et 3). Cette modélisation avait pour objectif de représenter la répartition spatio-temporelle des actions culturales à l'échelle d'un bassin versant.
2. *Une seconde partie de modélisation biophysique* qui comprend (i) la modélisation des processus biophysiques qui modifient l'infiltrabilité du sol via la modélisation de l'évolution des états de surface du sol entre les actions culturales (chapitres 4 à 7) et (ii) la modélisation de deux indicateurs biophysiques dont dépendent les décisions techniques : la travaillabilité et la traficabilité du sol (chapitre 8).
3. *Une troisième partie de construction et de mise en oeuvre du modèle couplé* qui comprend (i) le couplage de l'ensemble des modèles unitaires (chapitre 9) et (ii) l'application du modèle couplé à un cas réel (chapitre 10).

Ce chapitre discute les principaux résultats de la thèse et propose ensuite les perspectives et les issues du travail réalisé.

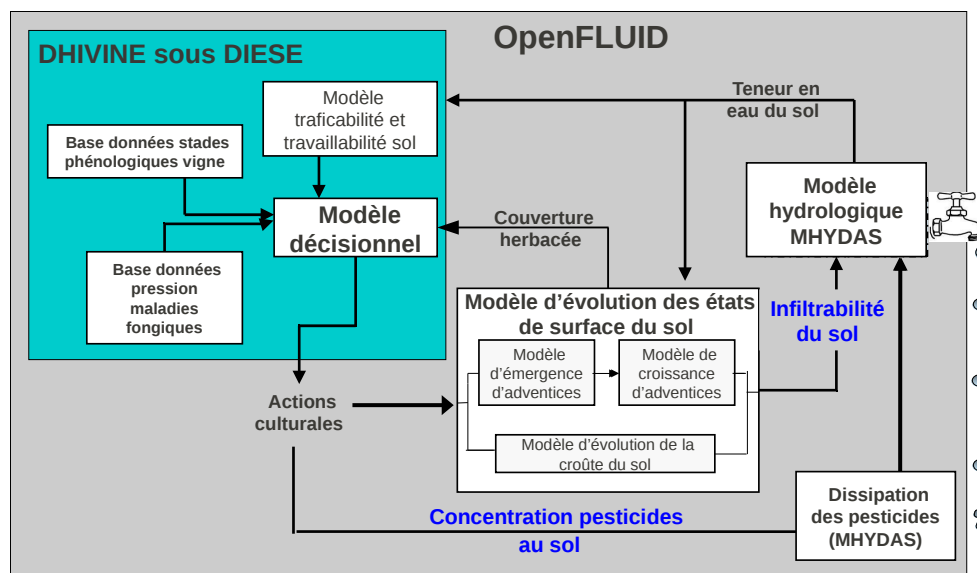


FIGURE 10.11 – Schéma du modèle conceptuel appliqué au cas d'étude

Le rectangle bleu représente le modèle DHIVINE développé sous l'environnement DIESE et le rectangle gris représente l'environnement OpenFLUID.

11.1 Les principaux résultats

11.1.1 DHIVINE, un modèle décisionnel sur les systèmes de culture viticoles pour la représentation des calendriers d'actions culturales à l'échelle de bassins versants

L'infiltrabilité du sol et la concentration en pesticides au sol sont modifiées lors d'actions de travail du sol et d'application de pesticides. Le modèle décisionnel DHIVINE développé avait donc pour objectif de fournir une représentation de la répartition spatio-temporelle de ces actions culturales.

Ces actions sont sous contrôle de différentes décisions pour l'action que prennent les agriculteurs pour gérer techniquement leur exploitation, notamment leur choix stratégiques d'entretien du sol et de protection phytosanitaire mais également les décisions qui, au quotidien, définissent les choix tactiques de mise en oeuvre des stratégies en s'adaptant à différents facteurs incontrôlables comme le climat. Les processus de gestion technique qui définissent la conduite technique au sein d'une exploitation et donc les actions culturales peuvent ainsi être représentées par des ensembles de règles et de variables décisionnelles. On a donc procédé à 54 enquêtes chez des viticulteurs répartis sur un bassin versant de 75 km². Ainsi les exploitations étaient variées en termes de conduites techniques, de contraintes parcellaires et de contraintes sur les ressources. Cette analyse des différentes conduites techniques a permis de déterminer quels processus devraient être représentés par le modèle et avec quelle variabilité entre les exploitations.

On a ainsi développé un modèle déterministe de gestion technique des exploitations viticoles. Le modèle représente en parallèle les processus de gestion technique de l'ensemble des exploitations cultivant au moins une des parcelles du territoire pour lequel on veut évaluer des impacts hydrologiques. Il simule pour chaque parcelle de chaque exploitation modélisée, l'itinéraire technique réalisé tout au long du cycle cultural. Le modèle tient compte du découpage

spatial défini par les parcelles culturales mais également par les rangées intra-parcellaires qui peuvent présenter différents entretiens du sol et donc différents états d'infiltrabilité du sol et de concentration en pesticides au sol. En s'appuyant sur l'ontologie de l'environnement informatique DIESE sous lequel le modèle DHIVINE a été développé, il représente les processus de gestion technique sous la forme d'un plan d'action qui est une séquence de périodes organisant la concurrence entre les différents travaux qui ont chacun leurs propres règles de déroulement. Le plan est mis en oeuvre tactiquement à l'échelle de la journée. La dynamique des actions culturales simulée repose ainsi sur les différents éléments qui conditionnent le déroulé des actions au sein d'une exploitation : les ressources, l'organisation du travail, les choix de conduites techniques des différents travaux réalisés au cours du cycle cultural, l'environnement incontrôlable (climat, maladie).

Le modèle DHIVINE offre, en comparaison des approches existantes, des possibilités larges d'expérimentation virtuelle sur des aspects variés des conduites techniques des exploitations viticoles en présentant une structure adaptée à l'expérimentation à l'échelle de territoire. Compte tenu d'une représentation assez précise des conduites techniques, le modèle demande cependant un grand nombre de paramètres dont la majorité sont de type qualitatif. Cette paramétrisation nécessite alors la réalisation d'enquêtes si on souhaite appliquer le modèle en situation réelle pour un territoire donné. Finalement, le modèle n'offre pas, à ce jour, la possibilité de tester l'ensemble des conduites techniques viticoles mais sa structure permet d'envisager le développement de la modélisation de travaux culturaux insuffisamment ou pas encore modélisés dans DHIVINE.

11.1.2 Une modélisation de la dynamique de l'infiltrabilité du sol via la modélisation de l'évolution des états de surface du sol

Un deuxième type de processus participe à la variabilité spatio-temporelle de l'infiltrabilité du sol et de la concentration en pesticides au sol : ce sont les processus biophysiques. En effet, les deux variables, une fois modifiées de manière discrète dans le temps par les actions culturales, évoluent de manière continue sous le contrôle de processus biophysiques : sous l'effet du climat et du temps, la concentration en matières actives peut diminuer et l'état de surface évoluer et ainsi modifier l'infiltrabilité du sol. Une modélisation de l'évolution de la concentration en matières actives au sol étant disponible dans le modèle MHYDAS, le travail de thèse s'est concentré sur la modélisation de la dynamique de l'infiltrabilité sous l'effet des processus biophysiques. Deux processus majeurs sont en jeu : (i) l'évolution de la surface du sol après un travail du sol sous l'effet de la pluie qui diminue l'infiltrabilité et (ii) le développement d'une couverture herbacée qui augmente l'infiltrabilité.

Pour représenter l'évolution temporelle de l'infiltrabilité du sol entre deux actions culturales, une démarche originale via la représentation de la dynamique d'évolution des états de surface du sol a été développée. On s'est basé sur une typologie existante qui différencie des états de surface selon leur infiltrabilité mesurée dans le cadre d'expérimentations avec des simulateurs de pluie.

L'évolution de la surface du sol après un travail du sol a été modélisée par le biais d'une régression logistique. Le modèle, en se basant sur le cumul d'énergie cinétique depuis le dernier travail du sol et la charge caillouteuse au sol, fournit des probabilités d'occurrence pour trois types d'états de surface du sol : (i) un état fraîchement travaillé très infiltrant, (ii) un état qui présente un développement partiel de la croûte de surface et une compaction limitée, (iii) un

état croûté et compacté. Le modèle produit fournit des taux d'états de surface bien classés d'environ 90%.

Pour modéliser le développement de la couverture herbacée consécutive à la croissance des plantes adventices, on a d'abord procédé à une étude de la structure des communautés des plantes adventices dans la zone d'étude. Des relevés floristiques pour différentes modalités d'entretien du sol, de type de sol et pour deux périodes de l'année (automne-hiver et printemps-été) ont été réalisés. Cette étude spatiale a été complétée par une étude de l'évolution temporelle des communautés par comparaison des résultats des observations avec des relevés de 30 ans antérieurs. Les résultats obtenus montrent que, dans un lieu donné, une communauté est dépendante de la saison du fait des différents cycles de développement des espèces mais ils indiquent également une forte influence anthropique par le biais de l'entretien du sol. La modalité de destruction du couvert et son rythme influent sur les espèces présentes. D'ailleurs, la comparaison entre les relevés floristiques de 2009 et de 1979 a mis en lumière des différences de structuration des communautés dans le cas des sols désherbés chimiquement du fait des changements de molécules d'herbicide employées. Les types de sols, selon leur pH et leur hydromorphie, favorisent ou à l'inverse interdisent la présence de certaines espèces mais ils semblent moins discriminer les espèces que les modalités d'entretien du sol. Cette étude des communautés floristiques nous a permis de définir une représentation du paysage adaptée à la modélisation du développement de la couverture herbacée : des listes d'espèces principales ont été définies en fonction de la saison, de trois modalités d'entretien du sol mises en oeuvre à l'échelle de la rangée intra-parcellaire (désherbage chimique, travail du sol, combinaison de désherbage chimique et travail du sol) et de trois types de sol (à pH acide, hydromorphe, autre).

Une modélisation des processus de germination et de croissance des plantes a été mise en oeuvre. Deux modèles mécanistes existants ont été paramétrés pour 5 espèces de la zone d'étude : (i) le modèle de temps hydrothermal pour la germination qui s'appuie sur la température et le potentiel hydrique du sol et (ii) le modèle de conductance pour la croissance qui s'appuie sur la température et le rayonnement. Un contrôle de cohérence par expertise de la modélisation indique que l'absence de modélisation de la sénescence ainsi que la paramétrisation de la densité de graines pouvaient conduire à une sur-estimation de la couverture herbacée. Par ailleurs, on a pu voir que la modélisation était sensible à la température mais qu'à l'échelle d'un cycle cultural, la dynamique de la couverture herbacée semblait peu sensible à la teneur en eau du sol.

Finalement, on a proposé une modélisation de la dynamique continue de l'infiltrabilité du sol à partir de la modélisation de la variation discrète des états de surfaces du sol. L'infiltrabilité simulée est dépendante de l'état de surface du sol nu qui évolue linéairement entre (i) l'état d'infiltrabilité maximal correspondant à un état fraîchement travaillé du sol et (ii) l'état d'infiltrabilité minimal correspondant à un état croûté et compacté. En complément, l'infiltrabilité peut être augmentée si le niveau de la couverture herbacée du sol dépasse les 25%. L'amélioration de l'infiltrabilité est maximale quand la couverture herbacée atteint les 50% dans la mesure où elle ne dépasse par l'infiltrabilité maximale définie par l'état fraîchement travaillé. De 25 à 50% de couverture, l'infiltrabilité est améliorée de manière linéaire. En l'absence de données de validation suffisantes, un contrôle de cohérence par expertise de la modélisation a permis d'illustrer une évolution cohérente de l'infiltrabilité du sol en fonction de différents itinéraires techniques.

En conclusion, par la voie de la modélisation des états de surface du sol, on a mis en oeuvre une représentation cohérente de la dynamique de l'infiltrabilité du sol sous l'effet de processus

biophysiques à l'échelle de bassin versant. Si le modèle d'évolution des états de surface après un travail du sol a pu être validé, l'insuffisance de données pour la validation du modèle de développement de la couverture herbacée conduit à une incertitude sur la validité des niveaux d'infiltrabilité simulés. En effet, par expertise, on a pu constater des mauvaises simulations ponctuelles de la couverture herbacée au cours d'un cycle cultural qui amènent nécessairement des sur-estimations ou des sous-estimations de l'infiltrabilité simulée.

Le modèle développé peut être employé dans des zones agricoles et pédo-climatiques similaires, c'est à dire en plaine viticole languedocienne. Pour d'autres cas, une approche similaire peut être mise en oeuvre : les modèles de régression logistique, de temps hydrothermal et de conductance peuvent être employés et paramétrés en fonction de données d'observations d'états de surface du sol et de communautés floristiques de la zone d'étude.

11.1.3 Les indicateurs pour la décision : entre modélisation biophysique et détermination de seuils

On a vu que l'infiltrabilité de la surface du sol ainsi que la concentration en matières actives au sol dépendent simultanément des actions culturales des agriculteurs et de processus biophysiques qui les font évoluer entre deux actions culturales. D'autres processus biophysiques peuvent indirectement modifier les valeurs de ces deux variables en modifiant la répartition spatio-temporelle des actions culturales. Ces processus sont à l'origine des états du milieu utilisés comme indicateurs de la décision pour les agriculteurs.

Trois indicateurs principaux ont été identifiés pour le cas d'étude : (i) la couverture herbacée qui déclenche le travail du sol en période printanière, (ii) les stades phénologiques des cépages qui constituent un repère temporel du développement de la plante et qui est particulièrement utilisé pour la gestion de la protection phytosanitaire, (iii) la travaillabilité et la traficabilité du sol en lien avec la teneur en eau du sol qui définissent les jours où le sol est capable de supporter un travail ou le passage d'engins agricoles.

Différents choix de modélisation ont été retenus pour ces indicateurs : (i) la couverture herbacée est modélisée comme indiqué au paragraphe précédent, (ii) les stades phénologiques sont définis dans une base de données d'observations, (iii) la teneur en eau du sol est produite par le modèle hydrologique MHYDAS.

Mais au-delà de la modélisation de la variable physique s'est posée la question de la valeur des seuils utilisés dans les règles pour l'action des viticulteurs. La variable modélisée doit nécessairement être traduite pour incarner l'indicateur utilisé par l'agriculteur. On a ainsi réalisé un travail approfondi pour le cas de la travaillabilité du sol. Un réseau de parcelles a été constitué pour être représentatif de différents types de sol majoritaires dans la zone d'étude. A la suite de 3 événements pluvieux printaniers, des mesures d'humidité ont été réalisées sur les parcelles. Chaque mesure d'humidité était associée au diagnostic de viticulteurs qui, en allant sur la parcelle, l'avaient déclarée travaillable ou non. Les résultats ont montré que les seuils de teneur en eau du sol définissant sa travaillabilité variaient en fonction de l'historique pluvieux et de l'état d'avancement des travaux. En effet, des seuils plus bas de teneur en eau du sol et donc plus limitants en terme de nombre de jours disponibles théoriques ont été observés à des périodes sèches et de faible concurrence avec d'autres travaux. Au cours d'une période pluvieuse et en situation de retard sur le travail du sol, les viticulteurs ont indiqué des seuils de travaillabilité correspondant à des seuils de teneur en eau plus élevés. Ils étaient donc plus tolérants sur l'état du sol et prêts à le travailler en état humide.

Dans le cadre de la modélisation du fonctionnement d'agro-écosystème, l'intégration d'un

modèle décisionnel pour la représentation des actions culturelles implique nécessairement la modélisation des indicateurs de la décision dont certains correspondent à des états du milieu. Leur modélisation comprend alors la détermination des seuils qui permettent de traduire la variable en un indicateur. De la même façon qu'on a réalisé des enquêtes pour déterminer les règles et variables décisionnelles, il nous a paru pertinent de solliciter les viticulteurs pour déterminer les seuils pour les indicateurs. Ce travail de mise en correspondance de valeur de variables physiques avec l'expertise des agriculteurs est cependant fastidieux et difficile à valider sinon à disposer de calendriers culturels complets de plusieurs viticulteurs et sur plusieurs années climatiques.

11.1.4 Le couplage de modèles pour la représentation du fonctionnement d'agro-écosystème : des choix pour rendre compatible les différentes échelles spatiales et temporelles

Suite aux développements ou à la sélection des modèles thématiques unitaires, le couplage des modèles a eu pour objet d'aboutir à la représentation d'une partie du système complexe qu'est un écosystème cultivé. Le fonctionnement d'un tel système est piloté par des processus anthropiques et biophysiques qui se réalisent à des échelles de temps et d'espace différentes et qui interagissent les uns avec les autres. Le couplage de ces processus représente une difficulté majeure dans les approches mixtes associant des représentations de nature biophysique et décisionnelles. Le couplage de modèles que l'on a cherché à mettre en oeuvre intègre donc cette caractéristique multi-échelles du système et permet la représentation des interactions existantes entre les différents processus (figure 10.11).

Pour ce faire, on a mis en oeuvre des choix conceptuels et des outils informatiques associés permettant la réalisation d'un tel couplage. Ainsi le modèle couplé pression-impact est abrité par la plateforme OpenFLUID particulièrement adaptée à la modélisation des flux dans les paysages cultivés. Les modèles biophysiques ayant été majoritairement développés sous cette plateforme, l'enjeu majeur du couplage a concerné la mise en relation de la plateforme OpenFLUID avec l'environnement DIESE sous lequel a été développé le modèle décisionnel DHIVINE.

Le principe technique de base du couplage repose sur le partage de mémoire entre DIESE et OpenFLUID grâce à une édition de liens qui permet le partage du langage (les deux environnements étant programmés en C++). OpenFLUID est le superviseur de la simulation, il lance DIESE lors de son premier épisode de simulation. DIESE s'arrête à une date donnée, définie par l'utilisateur. Des échanges d'informations entre DIESE et OpenFLUID peuvent alors avoir lieu dans les deux sens via des structures fournies par DIESE. Les informations échangées permettent de définir « qui/quoi a quelle valeur et quand ? ». Après ce « moment d'échange », DIESE est de nouveau lancé par OpenFLUID, etc... jusqu'à la date de fin de simulation (commune pour les deux composants DIESE et OpenFLUID du simulateur couplé).

Sur la question des échelles temporelles, le couplage réalisé respecte la dynamique temporelle de chaque type de processus. Chaque modèle fonctionne à son propre pas de temps : un pas de temps de l'ordre de la minute pour le modèle hydrologique MHYDAS, un pas de temps de la journée pour les modèles d'évolution des états de surface, un pas de temps de l'heure pour le modèle décisionnel DHIVINE. Les échanges d'informations entre DIESE (donc DHIVINE) et OpenFLUID (donc les modèles biophysiques) est réalisé par défaut au pas de temps de la journée mais d'autres moments d'échanges d'informations peuvent être provoqués

à l'initiative du modèle de décision DHIVINE si nécessaire. Tout se passe comme si chaque viticulteur réactualisait son agenda de travail chaque matin suite à la prise d'informations. Puis il tente de réaliser cet agenda dans la journée en s'adaptant aux éventuels aléas climatiques simulés en interne à DHIVINE. Le modèle a donc besoin des informations biophysiques en provenance d'OpenFLUID une fois par jour, éventuellement deux si une remise en question du programme est à réaliser. Le décalage des simulations décisionnelles et biophysiques (cette dernière étant réalisée en second pour la même période) permet ainsi à DHIVINE d'obtenir les informations biophysiques les plus récentes à la date du moment d'échange d'informations, de réaliser sa propre simulation pour, en retour, fournir à OpenFLUID le calendrier spatialisé des actions culturales pour la période simulée. OpenFLUID peut alors conduire la simulation biophysique et notamment hydrologique sur la même période qui s'arrête avec le moment d'échange d'informations suivant.

Sur la question des échelles spatiales, deux problèmes conceptuels ont dû être gérés : (i) l'unité spatiale pour la modélisation et (ii) le périmètre d'étude de la modélisation qui tous deux différaient pour les modèles décisionnel et hydrologique. Il a donc fallu les rendre compatibles.

Concernant l'unité spatiale pour la modélisation, elle correspond à la rangée de la parcelle culturale dans le cas du modèle décisionnel DHIVINE et à l'unité hydrologique (dépendante principalement de la parcelle culturale, du type de sol et de la pente) pour le modèle hydrologique MHYDAS. On a donc fait le choix de reporter sur les unités hydrologiques MHYDAS la structure de la parcelle culturale par 4 types de rangées telle qu'elle est défini dans DHIVINE. Il n'y a cependant pas de segmentation formelle. Chaque unité hydrologique se voit définir des sous-unités à l'échelle desquelles les processus hydrologiques sont traités de manière multi-locale (sans échanges latéraux avec des unités voisines) puis l'information est réaggrégée pour simuler les interactions avec les unités voisines. Concrètement les processus verticaux sont traités parallèlement et les résultats sont agrégés pour le traitement des processus horizontaux.

Concernant le périmètre spatial, il correspond, pour le modèle décisionnel DHIVINE, à la somme des territoires des exploitations cultivant au moins une parcelle du territoire pour lequel on veut évaluer des impacts et, pour le modèle hydrologique MHYDAS, il correspond à un bassin versant qui est, typiquement, le territoire de l'étude d'impacts. Le choix a été fait de restreindre la modélisation biophysique au bassin versant étudié et d'intégrer les parcelles « externes » (nécessaires à la modélisation décisionnelle) en faisant l'hypothèse qu'elles ne sont pas soumises à une influence biophysique de l'amont. Un simple bilan hydrique statique est effectué sur ces parcelles.

Les choix réalisés pour le couplage ont permis de représenter les interactions entre les trois grands pôles de la modélisation (décisionnel, hydrologique et biophysique) tout en respectant les échelles de modélisation de chaque type de processus. Les principales interactions mises en oeuvre dans le modèle couplé sont :

- la modification de l'infiltrabilité du sol (qui influe sur le partage infiltration/ruissellement) par l'évolution des états de surface et de la couverture herbacée, dépendants des actions culturales simulées par DHIVINE ;
- la dépendance de la germination et donc du développement des adventices à la teneur en eau de surface du sol sous contrôle des processus hydrologiques ;
- et en retour l'effet de la dynamique du couvert herbacé sur les processus d'évapotranspiration et sur les actions culturales ;
- la dépendance des actions culturales à la teneur en eau de surface du sol.

Le couplage a nécessité de rendre compatibles les différentes échelles spatiales et temporelles employées pour la modélisation des processus décisionnels, hydrologiques et biophysiques mis en jeu dans le fonctionnement de l'agro-écosystème viticole étudié. Les choix effectués ont permis de respecter les échelles propres à chaque modèle mais ont conduit à certaines simplifications de la représentation du fonctionnement de l'agro-écosystème particulièrement sur la question de l'unité spatiale pour la modélisation.

Le besoin de représentation des processus biophysiques à l'échelle de la rangée de la parcelle culturale du fait de la modélisation décisionnelle pose des questions de changement d'échelle pour la modélisation hydrologique : comment réaggréger les variables calculées à l'échelle de la rangée pour retrouver des résultats cohérents à l'échelle de l'unité hydrologique ? Cette question n'a d'ailleurs pas été résolue dans le cadre de la thèse en ce qui concerne les flux de polluants. On notera que cette question est assez contextuelle aux cultures pérennes en rangées.

A l'opposé, une question équivalente se pose pour la modélisation décisionnelle : comment réaggréger les variables calculées à l'échelle de la rangée (mais pour chaque unité hydrologique incluse dans la parcelle culturale) pour établir la valeur de l'indicateur pour la parcelle ? En effet, si une parcelle contient 2 unités hydrologiques, OpenFLUID fournira à DHIVINE 2 valeurs pour une variable pour chaque type de rangée de la parcelle. Dans le cadre de la thèse des choix très simplificateurs ont été effectués : par exemple, de prendre la moyenne des valeurs en ce qui concerne la couverture herbacée.

11.1.5 Le modèle couplé DHIVINE - MHYDAS, de la structure théorique à l'application pratique : premiers éléments d'évaluation du modèle

A partir du modèle conceptuel, on a construit un modèle informatique couplant différents modèles thématiques unitaires et permettant ainsi des interactions entre trois grands types de processus représentant le fonctionnement de l'agro-écosystème : les processus décisionnels, hydrologiques et biophysiques. Ce modèle se base sur une approche déterministe et mécaniste de la représentation des processus. Comme on l'a évoqué précédemment, la représentation systémique de l'agro-écosystème n'est cependant pas complète car la modélisation des flux de polluants n'a pu être intégrée dans le modèle sur la durée de la thèse.

Une application pratique du modèle couplé a été réalisée pour tester la fonctionnalité du modèle et entreprendre une première évaluation des résultats. Pour ce faire, le modèle a été paramétré pour un cas réel concernant trois exploitations. On a évalué différentes variables de sorties intermédiaires : les calendriers d'actions culturales à l'échelle de l'exploitation et de la parcelle, les états de surface du sol et l'infiltrabilité du sol à l'échelle de la rangée.

Les résultats obtenus montrent que l'approche déterministe précise de modélisation des conduites techniques choisie pour la modélisation décisionnelle 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. Par ailleurs, à l'échelle de la rangée de la parcelle culturale, on a pu voir que la dynamique simulée des états de surface du sol et donc de l'infiltrabilité du sol 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 donc liée à la qualité des résultats des modèles en amont.

Le modèle produit donc des résultats prometteurs dans une perspective d'expérimentation

virtuelle des pratiques culturelles à l'échelle de bassins versants car il peut, à l'échelle d'un cycle cultural et pour des stratégies de gestion technique fixées, permettre d'explorer les propriétés dynamiques des agro-écosystèmes et leur comportement complexe. Les modèles développés dans le cadre de la thèse et leur couplage répondent aux insuffisances de représentation, à l'échelle de territoire constatées dans la littérature, (i) de la temporalité des actions culturelles, (ii) de leur dépendance aux contraintes d'organisation du travail des exploitations et (iii) de leur relation avec le fonctionnement de l'éco-système.

Cependant, si les contrôles intermédiaires ont permis de constater la fonctionnalité de la paramétrisation dynamique du modèle hydrologique pour des variables d'états de l'agro-écosystème modifiées par les actions culturelles, il reste à démontrer l'opérationnalité du modèle pour l'évaluation des impacts à l'échelle du bassin versant. Ainsi il sera possible de tester l'hypothèse sur laquelle s'est basée ce travail : les impacts hydrologiques des systèmes de culture dépendent de la variabilité spatio-temporelle de variables d'état de l'écosystème modifiées par les actions culturelles.

11.2 Les perspectives

Ce travail de thèse a permis de construire la structure d'un modèle d'évaluation des impacts hydrologiques des pratiques culturelles à l'échelle de bassins versants dans le cadre d'une problématique de pollution de l'eau par les pesticides en milieu viticole languedocien. Deux axes majeurs constituent les perspectives de recherche de ce travail : (i) l'opérationnalisation du modèle couplé qui inclut son évaluation, (ii) la définition de stratégies de paramétrisation du modèle décisionnel.

Avant de pouvoir utiliser le modèle pour l'évaluation des impacts, il sera nécessaire de procéder à une évaluation plus complète des résultats produits et particulièrement à l'échelle du bassin versant. Le contrôle de la répartition spatio-temporelle des variables de pression : infiltrabilité du sol et concentration en matières actives au sol demeure à réaliser. Puis une validation des simulations de flux d'eau et de polluants à l'exutoire permettrait de valider les variables de sorties hydrologiques destinées à constituer le diagnostic intégré de l'évaluation des impacts à l'échelle du bassin versant. De telles validations nécessiteront l'intégration de la modélisation des flux de polluants et donc la résolution de la question du mode de réaggrégation des variables de l'échelle de la rangée à l'échelle de l'unité hydrologique. Par ailleurs, pour une application du modèle à l'échelle de bassins versants il sera nécessaire d'adopter une stratégie de paramétrisation de l'infiltrabilité pour les parcelles non cultivées en vigne.

Du fait de la représentation de système complexe, un grand nombre de paramètres est nécessaire à la mise en oeuvre du modèle couplé. Notamment, dans un cadre d'expérimentation virtuelle de pratiques culturelles, il sera nécessaire de paramétrer le modèle décisionnel DHIVINE pour un nombre conséquent d'exploitations agricoles. En fonction des objectifs d'utilisation du modèle d'évaluation (par exemple, une évaluation des leviers au niveau des choix stratégiques des conduites techniques ou au niveau tactique), des jeux de paramètres devront être définis pour répondre aux plans d'expérimentation. Des conduites techniques archétypales pourraient alors être définies. Une étude des liens entre les structures d'exploitation (ressources, parcellaire) et les choix de conduites techniques sur la base des résultats des enquêtes effectuées pourrait contribuer à la définition de ces archétypes.

Table des figures

1	Démarche générique de modélisation couplée pression-impact	21
1.1	Localisation géographique de la zone d'étude	30
1.2	Cycle végétatif et reproducteur de la vigne	31
1.3	Photo d'une parcelle de vigne vue du ciel	31
1.4	Paysage de la basse vallée de la Peyne (1)	32
1.5	Paysage de la basse vallée de la Peyne (2)	33
1.6	Paysage de la basse vallée de la Peyne (3)	34
1.7	Coupe géo-pédologique des sols de la Peyne	34
1.8	Paysage de la basse vallée de la Peyne (4)	35
1.9	Diagramme de la démarche de modélisation couplée pression-impact	38
1.10	Schéma du modèle conceptuel	39
1.11	Trois modalités d'entretien du sol (de gauche à droite : travail du sol, enherbe- ment, désherbage chimique)	40
1.12	Photo de traitement phytosanitaire dans les vignes	41
1.13	Typologie des états de surface réalisée par Andrieux et al. (2001) en zone viticole méditerranéenne	48
1.14	Infiltrabilité de différents types d'états de surface	48
1.15	La partie du modèle conceptuel traitée dans la partie I	61
2.1	Représentation globale de la gestion technique de la sole de blé dans l'exploitation	66
2.2	Combinaison dans l'espace d'entretiens du sol par enherbement et par travail du sol sur les inter-rangs et par désherbage chimique sur le rang	69
2.3	Calendrier des travaux viticoles	70
2.4	Représentation de la répartition spatiale de parcellaires d'exploitations enquêtées	71
2.5	Distribution des modalités d'entretien du sol de 20 exploitations (une exploita- tion par ligne) suivant différents lots de parcelles	72
3.1	Système de production agricole (exemple d'une production sous serre)	90
3.2	Composants du pilote et principales références aux autres sous-systèmes	92
3.3	Les échelles dans DHIVINE	94
3.4	Le système de production dans DHIVINE	95
3.5	Architecture du système biophysique dans DHIVINE	96
3.6	Répartition spatiale des parcelles modélisées sous DHIVINE	97
3.7	Structure de la parcelle dans DHIVINE	98
3.8	Constitution dynamique des listes d'activités par trois méthodes des chantiers .	112
3.9	Périodes dont dépend l'organisation du travail	114
3.10	Exemple d'un plan d'activité dans DHIVINE	116
3.11	La partie du modèle conceptuel traitée dans la partie II (en bleu)	133

4.1	Spatial distribution of soil and geomorphological units in the Roujan catchment. b. Sampling design	139
4.2	The three stages of soil surface evolution after tillage.	140
4.3	Results of the model at two dates : May, 30 th 2007 and June, 19 th 2007. a. Dates of tillages for each plot. b. Rainfall between June, 1 st and June, 19 th . c. Soil surface characteristics predicted by the model on May, 30 th . d. Probabilities associated to the prediction on May, 30 th . e. Soil surface characteristics predicted by the model on June, 19 th . f. Probabilities associated to the prediction on June, 19 th	152
5.1	Illustration représentant la méthode des points contacts d'échantillonnage de la végétation herbacée en transect linéaire, d'après Hubert (1978).	164
5.2	Box-plot de la richesse spécifique intra-parcellaire à l'automne et au printemps	168
5.3	Box-plot de la distribution des types biologiques à l'automne et au printemps	168
5.4	Box-plot de la richesse spécifique intra-parcellaire à l'automne et au printemps pour trois modalités d'entretien du sol.	169
5.5	Analyses canoniques des correspondances sur l'entretien du sol (a,b,c,d) et le type de sol (e,f,g,h) à deux saisons : automne (a,b,e,f) et printemps (c,d,g,h).	170
5.6	Comparaison des fréquences (graphes a et b) et des abondances (graphes c et d) centrées et réduites des espèces rémanentes pour les parcelles travaillées et entretenues par désherbage chimique entre les relevés de 1979 et 2008-2009. Situation dans la communauté floristique en terme de fréquence et abondance des espèces disparues (+) et nouvelles (o) pour les parcelles travaillées et entretenues par désherbage chimique (graphes e et f).	178
6.1	Processus d'émergence d'une graine	187
6.2	Représentation de l'effet de la dormance sur la germination des adventices	190
6.3	Effets modélisés des actions d'entretien du sol sur le couvert herbacé	192
6.4	Evolution de la couverture herbacée du sol pour trois itinéraires techniques : travail du sol ; désherbage chimique et combinaison désherbage chimique et travail du sol avec un potentiel hydrique fixe de -0.088 MPa.	196
7.1	Les trois types d'états de surface modélisés sur sols nus après travail du sol	204
7.2	Représentation de l'évolution de l'infiltrabilité sur sol nu après un travail du sol	204
7.3	Forme des courbes de probabilités des trois différents types d'état de surface selon le cumul d'énergie cinétique	205
7.4	Représentation de l'évolution de l'infiltrabilité sous l'effet de la croissance d'un couvert herbacé sur un sol compacté présentant une croûte structurale continue (Cst)	206
7.5	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 trois itinéraires techniques (de haut en bas) : travail du sol (1a;1b); désherbage chimique (2a;2b); combinaison désherbage chimique et travail du sol (3a;3b).	208
7.6	Comparaison des évolutions des états de surface, du taux de couverture herbacée et de l'infiltrabilité entre un sol peu caillouteux et un sol très caillouteux entretenus par travail du sol.	210
8.1	Pluie mensuelle à Roujan entre le 1er septembre 2008 et le 1er septembre 2009	223
9.1	Schéma du modèle conceptuel appliqué au cas d'étude	236
9.2	Gestion dynamique du couplage MHYDAS-DHIVINE	241
9.3	Périmètres d'études de MHYDAS et DHIVINE	243

9.4	Diagramme du modèle couplé DHIVINE-MHYDAS	244
10.1	Climat de l'année culturale 2004-2005 (pluviométrie cumulée et température moyenne)	256
10.2	Parcellaires en vigne des trois exploitations agricoles étudiées	257
10.3	Schéma conceptuel du modèle couplé mis en oeuvre pour l'application au cas réel	265
10.4	Calendrier cultural simulé de l'exploitation viticole MG16 pour l'année culturale 2004-2005	266
10.5	Calendrier cultural simulé de l'exploitation viticole NP13 pour l'année culturale 2004-2005	267
10.6	Calendrier cultural simulé de l'exploitation viticole NP06 pour l'année culturale 2004-2005	268
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	274
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	276
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	278
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).	281
10.11	Schéma du modèle conceptuel appliqué au cas d'étude	288

Liste des tableaux

1	Comparaison de quatre types d'approches d'évaluation des impacts hydrologiques des systèmes de culture	16
1.1	Pluviométrie mensuelle et annuelle moyenne ($\bar{P}$), en mm, mesurée à la station météorologique du bassin versant de Roujan de 1993 à 2003. Ecart types, σ	36
2.1	Règles et variables pour l'action avec des modalités hétérogènes en fonction des conduites techniques (1)	76
2.2	Règles et variables pour l'action avec des modalités hétérogènes en fonction des conduites techniques (2)	78
3.1	Les différents types de rangées de la parcelle de vigne dans DHIVINE	99
3.2	Les différentes stratégies d'entretien du sol dans DHIVINE	100
3.3	Les chantiers et leurs activités primitives dans DHIVINE	122
3.4	Les activités primitives et les opérations correspondantes dans DHIVINE	124
4.1	Equations relating time-specific kinetic energy (KE_{time}) and rainfall intensities (I) . .	141
4.2	Distribution of observations among SSC classes and predictor candidates	142
4.3	Distribution of two rainfall variables among the three soil surface characteristics stages	146
4.4	Cramer coefficients of the associations between the categorical predictor candidates . .	147
4.5	Values (D) of the likelihood ratio test of the proportional odds property of each predictor candidate	148
4.6	Deviance Information Criterion at each step of the upward selection of variables . . .	148
4.7	Average rates and standard deviations of SSC well-classified computed from the 10 cross-validation data sets for the four models	149
4.8	Coefficient estimates and their standard deviations for the Model B2	150
4.9	Average proportions and standard deviations of SSC well-classified computed from the ten cross-validation data sets for the three soil types of the study zone for the Model B2	150
5.1	Moyenne de l'abondance, fréquence et types biologiques des espèces à l'automne et au printemps	166
5.2	Proportions moyennes des types biologiques à l'automne et au printemps pour trois modalités d'entretien du sol.	169
5.3	Espèces majoritaires (indiquées par +) en fonction des entretiens du sol et des types de sol	172
5.4	Coefficients de rémanence et de transformation des communautés d'adventices pour les parcelles travaillées et les parcelles entretenues par désherbage chimique	177
5.5	Coefficients de Spearman	177

6.1	Itinéraires techniques simulés pour le contrôle expérimental de la couverture herbacée dans les vignes	193
6.2	Paramètres pour la modélisation de l'émergence et la croissance de cinq espèces	194
6.3	Espèces modélisées (indiquées par +) en fonction de la saison, du type d'entretien du sol et du type de sol	195
8.1	Densité de terre fine, taux d'argile et taux de cailloux des sols étudiés	220
8.2	Répartition des parcelles, des experts et des observations en fonction des types de sols étudiés	221
8.3	Caractéristiques et observations réalisées pour les trois événements pluvieux étudiés .	221
8.4	Seuils de travaillabilité en fonction des classes d'expert	222
8.5	Seuils moyens de travaillabilité en humidité volumique (%) pour les différents types de sols et les trois événements pluvieux suivis	222
8.6	Seuils de travaillabilité et de traficabilité définis dans DHIVINE	224
10.1	Caractéristiques des trois exploitations agricoles étudiées	258
10.2	Itinéraire technique simulé sur la parcelle MG16_02	270
10.3	Itinéraire technique simulé sur la parcelle NP13_01	271
10.4	Itinéraire technique simulé sur la parcelle NP06_03	272

RÉSUMÉ

Dans les bassins versants méditerranéens où les zones cultivées en vigne occupent une part importante de l'espace, les pratiques culturales sont un facteur important d'apparition de risques de pollution diffuse des eaux par les pesticides. Au cours de la thèse, une démarche de modélisation couplée pression-impact a été développée. La question de recherche a porté sur la prise en compte dans le modèle construit de la dynamique des variables d'état du milieu modifiées par les actions culturales. Deux variables ont été identifiées : l'infiltrabilité de la surface du sol et la concentration en matières actives au sol. A l'échelle du bassin versant, pour réaliser l'évaluation des impacts, on s'est appuyé sur l'utilisation du modèle hydrologique distribué MHYDAS qui permet de simuler les flux d'eau et de polluants selon différents scénarii de pratiques et climatiques. Pour représenter la répartition spatio-temporelle des opérations culturales sur chacune des parcelles du bassin versant, le modèle décisionnel DHIVINE a été construit. Il permet de simuler les itinéraires techniques des viticulteurs. Pour chaque exploitation du bassin versant, le modèle est basé sur une représentation de la conduite technique annuelle du vignoble sous forme de plans d'activités. Ces plans mettent en œuvre des indicateurs d'états de l'agrosystème et prennent en compte les caractéristiques des ressources productives de l'exploitation ainsi que les arbitrages à réaliser entre opérations culturales et parcelles concurrentes. Des modèles biophysiques ont été développés pour simuler les indicateurs de la décision ainsi que l'impact des différentes pratiques sur les états de surface du sol qui conditionnent l'infiltrabilité du sol en surface. Une typologie fonctionnelle des états de surface basée sur leurs propriétés d'infiltrabilité du sol a été utilisée pour développer une démarche visant une modélisation continue dans le temps de l'infiltration. Elle intègre une modélisation parallèle de la dynamique des états de surface du sol nu et du développement de la couverture herbacée par les adventices. Un couplage des modèles a été réalisé sous la plateforme OpenFLUID. La démarche adoptée ici permet de représenter les dynamiques différentes des variables d'état du milieu en fonction de différentes pratiques culturales et semble adaptée pour l'évaluation des impacts en terme de pollution de l'eau par les pesticides à l'échelle de bassins versants viticoles méditerranéens.

Mots clefs : viticulture, impacts hydrologiques, pratiques culturales, modélisation décisionnelle, pollution de l'eau, pesticides, bassin versant, modélisation hydrologique, couplage de modèles.

ABSTRACT

In Mediterranean catchments in which vineyards account for a major share of the area, cropping practices are an important factor with respect to increasing risks of diffuse pesticide pollution of water. This study was about developing an approach for pressure-impact modelling. The research question considered dynamics of agrosystem status variables modified by cropping actions. Two variables were identified : soil surface infiltrability and active material concentration on the soil. On a catchment scale, to assess impacts, we used the distributed hydrological model MHYDAS to simulate water and pollutant flows according to different cropping practice and climatic scenarios. To represent the spatiotemporal distribution of cropping operations on each plot, the decision model DHIVINE was built. It simulates vinegrowers's crop management sequences. For each farm in the catchment, the model is based on a representation of the vineyard annual technical management strategy in the form of activity plans. These plans involve agrosystem status indicators and take into account the characteristics of productive resources on the farm and arbitration between cultivation operations and competing plots. Biophysical models were developed to simulate decision indicators and impacts of cropping practices on soil surface characteristics which are drivers of soil surface infiltrability. A functional typology of soil surface states based on their soil infiltrability properties was used to develop an approach for temporally continuous modelling of infiltration. It was based on a parallel modelling of dynamics (i) of soil surface characteristics of bare soil and (ii) of weed cover development. Model coupling was realized with OpenFLUID platform. The approach developed herein allows simulating dynamics of agrosystem status variables as a function of cropping practices. It seems adapted for assessing hydrological impacts at the catchment scale in Mediterranean environments.

Keywords : vinegrowing, hydrological impacts, cropping practices, decision modelling, water pollution, pesticides, catchment, hydrological modelling, model coupling.