

Chapitre 3

Le modèle DHIVINE (Decision model of agricultural practices

for assessing Hydrological Impacts in VINEyard growing systems)

Sommaire

3.1	Introduction	87
3.2	Matériel et méthodes	88
3.2.1	Le système de production agricole dans DIESE	89
3.2.2	La représentation de la stratégie de conduite	91
3.2.3	La mise en oeuvre de la stratégie : la procédure d'interprétation	93
3.3	Résultats	94
3.3.1	Echelles de temps et d'espace	94
3.3.2	Le système de production agricole dans DHIVINE	95
3.3.3	Le système biophysique ou la représentation du paysage	96
3.3.3.1	Le parcellaire d'exploitation	96
3.3.3.2	La distribution des modalités d'entretien du sol sur les parcelles	101
3.3.4	L'environnement dans DHIVINE	102
3.3.4.1	Le climat	102
3.3.4.2	L'état sanitaire des vignes	102
3.3.5	Le système opérant dans DHIVINE : les ressources	103
3.3.5.1	La main d'oeuvre	104
3.3.5.2	Le matériel	107
3.3.5.3	Les contraintes sur les ressources	108
3.3.6	De l'activité au plan : la construction de la stratégie de conduite dans DHIVINE	109
3.3.6.1	Rappel sur l'ontologie	109
3.3.6.2	De l'activité primitive au chantier	109
3.3.6.3	Du chantier au plan d'activité	112
3.3.7	Du plan aux activités réalisées : l'application de la stratégie de conduite dans DHIVINE et son interprétation	115
3.3.7.1	Le plan d'activités	115
3.3.7.2	L'organisation du travail en fonction des périodes	117
3.3.7.3	Un exemple de chantier : le travail du sol automnal	120
3.3.8	Quelques éléments d'implémentation et de paramétrisation de DHIVINE	126
3.4	Discussion et conclusion	127

Chapitre 3

Le modèle DHIVINE (Decision model of agricultural practices for assessing Hydrological Impacts in VINEyard growing systems)

3.1 Introduction

Pour évaluer les impacts hydrologiques des pratiques, on cherche à modéliser dynamiquement les actions culturales spatialement distribuées sur un bassin versant qui contribuent à modifier soit l'infiltrabilité du sol, soit la concentration en matières actives au sol. Cette partie présente le modèle qui a pour vocation de simuler le calendrier des actions culturales qui affectent les propriétés de ces deux variables (infiltrabilité, concentration en pesticides) pour chaque parcelle de la zone étudiée.

L'étude des processus de gestion technique de la partie précédente montre que la répartition spatio-temporelle des opérations auxquelles on s'intéresse dépend de la quasi totalité des actions culturales réalisées au cours d'un cycle. La conceptualisation de la conduite technique utilisée pour l'étude montre que les processus qui conduisent à la réalisation des actions peuvent être exprimés par un ensemble structuré de variables et de règles pour l'action. On a pu voir que ces variables/règles ont des modalités différentes selon les exploitations en fonction des méthodes de mise en oeuvre des objectifs. De plus, elles sont dépendantes d'indicateurs dynamiques (e.g. état des parcelles : stade phénologique, humidité du sol pour le travail ; avancement de travaux ; climat ; etc.). Elles s'appliquent aux parcelles regroupées en lot, qui constituent alors des unités de gestion, suivant leurs caractéristiques permanentes ou temporaires. Finalement, elles mettent en jeu les ressources de l'exploitation. Par conséquent, pour étudier l'effet des opérations culturales, il faut mobiliser un modèle de conduite technique d'exploitation capable de simuler temporellement et spatialement des actions de plusieurs exploitations, selon des plans d'action variables entre exploitations qui se réalisent dynamiquement sous contraintes de facteurs extérieurs incontrôlables et en fonction des ressources de l'exploitation. On se situe dans une approche systémique : l'exploitation étant un système incluant au moins un système biophysique, un système de décision et un système opérant qui exécute les décisions en mobilisant les ressources.

De nombreux modèles décisionnels de simulation de système de production agricole ont été développés dans les quinze dernières années (e.g. McCown et al., 2002 ; Chatelin et al., 2005). Cependant ces modèles font souvent abstraction des aspects spatiaux, temporels ou de gestion des ressources (Garcia et al., 2005) ou ils ne traitent que des niveaux stratégiques des systèmes de production (Martin-Clouaire et Rellier, 2003). Les formalismes les plus adaptés à la représentation des processus impliqués dans la conduite technique des exploitations agricoles se situent dans le champ de l'intelligence artificielle. On y trouve la modélisation d'agents

intelligents opérant dans un environnement dynamique et partiellement imprévisible ainsi que des langages pour exprimer une organisation procédurale des actions (e.g. De Giacomo et al., 2000 ; Woolbridge, 2002 ; Morley et Myers, 2004 ; Smith et al., 2005). Cependant, ces langages ne permettent pas à ce jour de gérer des raisonnements temporels sur des actions concurrentes en environnement incertain (Garcia et al., 2005 ; Martin-Clouaire et Rellier, 2006). Par conséquent, parmi les moyens actuels, trois outils ont semblé pouvoir répondre à nos besoins de modélisation : le modèle OTELO (Attonaty et al., 1993), l'environnement de modélisation DIESE (Martin-Clouaire et Rellier, 2009) et un environnement de modélisation développé par Guerrin (2009).

Le modèle OTELO (Organisation du Travail Et Langage à Objets) est un simulateur pour raisonner l'organisation du travail dans l'exploitation agricole. Le cadre de représentation du modèle s'appuie largement sur le modèle conceptuel pour l'action : les actions simulées dépendent des règles de constitution des chantiers, des règles d'enchaînement et des règles d'arbitrage¹ définies par périodes. Un test du modèle pour notre cas d'étude a révélé que son orientation pour l'organisation du travail et sa fonction d'outil d'aide à la décision dans un processus d'échange avec un agriculteur ne permettait pas de fournir un cadre de modélisation adéquat. En effet, OTELO a été construit pour simuler une exploitation à la fois, il est adapté pour les grandes cultures et pour répondre à des questions d'organisation du travail se posant sur des périodes temporelles limitées (par exemple, le semis de blé). Par conséquent, l'expression des règles, bien que reposant sur un vocabulaire et une grammaire, est fastidieuse et insuffisamment riche pour une situation de modélisation de plusieurs exploitations et les moyens pour définir dynamiquement les lots de parcelles tout au long du cycle sont limités car la représentation du système biophysique est extrêmement simplifiée voire absente.

Les environnements de modélisation dédiées à la simulation des actions agricoles se sont donc avérées plus adaptées à nos besoins de représentation de la conduite technique de l'exploitation. L'environnement de modélisation proposé par Guerrin (2009) est particulièrement adapté aux systèmes dont la dynamique s'exprime par des équations différentielles (par exemple pour des gestion de stocks), ce qui n'est pas notre cas. De plus des travaux de modélisation des systèmes viticoles avaient été initiés sous DIESE (Ripoche et al., 2009), c'est donc l'outil qui a été choisi pour le développement du modèle pour l'action. Une présentation de l'environnement est effectuée dans la partie suivante avant de présenter le modèle DHIVINE produit dans le cadre de la thèse.

3.2 Matériel et méthodes

DIESE (Discrete Event Simulation Environment) est une bibliothèque de classes C++ qui fournit un environnement de simulation qui comporte un moteur de simulation à événements discrets et une ontologie (Martin-Clouaire et Rellier, 2002) pour les systèmes de production agricole, c'est-à-dire un corps formel de connaissances sur la structure, le fonctionnement et la dynamique des systèmes, en particulier agricoles. Une partie notable de ce corps de connaissances porte sur le pilotage des systèmes, et sur les données et les raisonnements qu'il mobilise. Parmi les données, celles relatives au travail sont la nature, l'agencement, et les propriétés des activités, des opérations et des ressources qu'elles mobilisent. Les raisonnements portent sur la localisation spatio-temporelle des actes techniques, en fonction de la perception dynamique de l'état du système, et l'allocation des ressources aux activités. Ce cadre accorde une place importante à la modélisation du contexte dans lequel le travail se déroule, c'est-à-dire les

1. Ces notions sont présentées au chapitre précédent dans l'encart 2.1

conditions qui président à la détermination des activités à réaliser à un moment donné et au déroulement de leur réalisation. L'agent en charge de la conduite est modélisé à travers son observation (surveillance) de l'appareil de production, sa prise de décision en situation quant aux interventions sur cet appareil. Pour analyser le comportement organisationnel du gestionnaire, il est nécessaire de modéliser la nature circonstancielle des décisions opérationnelles qui, du fait des facteurs incontrôlables (e.g. le climat) pesant sur un système agricole, voient leur pertinence et leur faisabilité très dépendantes des conditions et contraintes courantes, en particulier celles qui concernent les ressources (Rellier et al, 2011). Développer un modèle sous DIESE consiste alors à déclarer les classes du domaine, leurs relations, et attributs, les structures de données et les paramètres du système en utilisant les classes et services de l'environnement DIESE. Les classes créées héritent des classes de DIESE qui implémentent l'ontologie.

Avant de présenter l'ontologie et la structure de modélisation proposée par DIESE, précisons la nature de l'investigation à laquelle le modèle est censé contribuer. Notre objectif d'évaluation des impacts hydrologiques des pratiques à l'échelle de bassin versant nous conduit à représenter la distribution spatio-temporelle d'un certain nombre d'actions culturelles influentes sur le comportement hydrologique de l'agro-écosystème. Le modèle qui doit simuler les actions culturelles a donc pour but de fournir des distributions plausibles des actions à l'échelle du bassin versant pour différentes combinaisons de conduites techniques d'exploitation. On souhaite donc que le modèle permette de tester l'effet sur la distribution des actions de différentes stratégies de conduites mises en oeuvre sous différentes contraintes sur les ressources dans les exploitations. Bien que notre évaluation ne vise pas principalement l'échelle de l'exploitation, il est nécessaire d'avoir une représentation assez sophistiquée des conduites techniques pour se donner les moyens d'évaluer l'influence du comportement décisionnel des chefs d'exploitation.

Nous présentons maintenant l'ontologie et la structure de modélisation dans DIESE, en reprenant en grande part la présentation de l'environnement réalisée par Martin-Clouaire et Rellier (2003).

3.2.1 Le système de production agricole dans DIESE

Le système de production agricole (figure 3.1) peut être caractérisé d'un point de vue systémique comme composé de trois sous-systèmes : le pilote, le système opérant et l'appareil producteur ou système biophysique. Le système est situé dans un environnement incluant, en particulier, le contexte climatique.

Avant de présenter plus en détail les trois sous-systèmes on définit les trois concepts fondamentaux de l'ontologie de DIESE qui seront évoqués par la suite : les *entités*, les *processus* et les *événements*. Ils représentent les aspects structurel, fonctionnel et dynamique du système de production.

Une *entité* décrit un objet (e.g. une plante), éventuellement abstrait, dans le domaine d'intérêt. L'état du système à un moment donné est la valeur des propriétés (attributs, héritages, associations) des entités qu'il inclut (e.g. le stade phénologique des plantes).

Un *processus* est la spécification d'une partie du comportement du système, c'est-à-dire des entités qu'il inclut (e.g. le processus de développement phénologique des plantes). Typiquement, le processus spécifiant ce comportement inclut l'utilisation de méthodes attachées aux entités affectées par le processus. Un processus provoque un changement d'état quand un événement particulier arrive.

Par conséquent, les *événements* contrôlent la temporalité des processus (e.g. l'évènement

d'élévation de la température de l'air). Pour chaque modèle, on fixe la longueur de l'unité atomique d'horloge. C'est la durée du plus petit intervalle de temps identifiable et manipulable par le modèle. Toutes les durées sont un nombre entier d'unités atomiques d'horloge.

L'*appareil producteur* est composé d'entités biophysiques (e.g. des plantes dans un milieu physique) qui ont leurs propres processus (e.g. photosynthèse, dynamique du micro-climat). Parmi les événements contrôlant ces processus se trouvent ceux résultant des opérations exécutées par le système opérant. Les entrées sont des intrants tels que les produits fertilisants introduits par le système opérant et l'énergie apportée par l'environnement ou le système opérant. Les processus biophysiques peuvent générer des événements déclenchés par des changements notables de l'état du système. L'appareil producteur est généralement équipé de capteurs et de dispositifs d'alarmes qui génèrent des informations exploitées par d'autres systèmes.

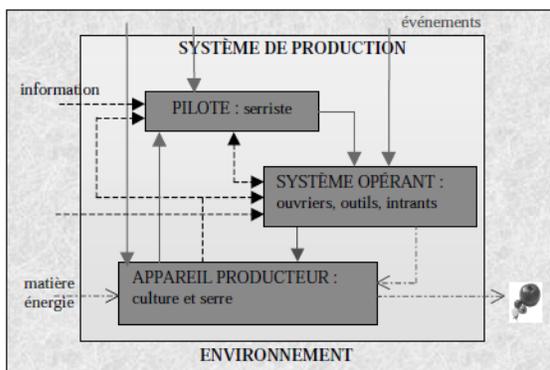


FIGURE 3.1 – Système de production agricole (exemple d'une production sous serre)

Le *pilote*, ici le chef de culture, est responsable de la réalisation des objectifs de production. A cet effet, il possède une stratégie de conduite (voir paragraphe suivant) qui contraint la détermination des actions exécutées par le système opérant et oriente ainsi indirectement le comportement de l'appareil producteur. *La stratégie de conduite spécifie la façon flexible d'organiser les activités, les adaptations qu'elle doit subir lorsque certains événements se produisent, et les principes à respecter par le système opérant pour établir précisément les actions à exécuter.* Elle définit aussi le rythme auquel le pilote doit l'examiner. Les processus attachés au pilote portent sur :

- la surveillance de l'occurrence d'événements décisifs et l'inspection de l'appareil producteur sur les aspects importants pour la conduite ;
- la révision de la stratégie dans des situations connues pour l'exiger ;
- la mise à jour des activités en fonction de l'avancée du temps et des changements survenus ;
- l'extraction par lecture de la stratégie des jeux d'activités (ensembles d'actions) candidats à exécution et la sollicitation du système opérant pour qu'il traite ces jeux.

Ces processus sont activés soit à des dates programmées à l'avance soit en réponse à des alarmes réclamant un traitement immédiat. En plus d'avoir accès aux données issues des capteurs des autres systèmes, le pilote a accès à certaines informations sur les autres systèmes à partir desquelles il synthétise des indicateurs pertinents pour ses décisions. Le système opérant est en charge de la transformation des jeux d'activités candidats en un jeu complètement déterminé d'activités exécutables qui nécessite l'allocation de ressources.

Pour représenter la gestion des ressources sous DIESE, on peut configurer les entrées/sorties du système de production qu'effectuent les ressources au cours du temps (e.g. pour représenter une main d'oeuvre saisonnière). Les ressources peuvent être regroupées en équipes, de manière permanente ou occasionnelle. Ensuite, et à des échelles de temps plus réduites telles la semaine ou la journée, on affecte à chaque unité (ou à chaque type) une fonction de disponibilité,

qui détermine à chaque instant si l'unité de main d'œuvre est mobilisable ou non par les activités. Par ailleurs, on choisit (ou on caractérise) les unités de main d'œuvre par leurs compétences, positives (« un ouvrier permanent sait désherber »), négatives (« un ouvrier à temps partiel ne sait pas travailler le sol »), ou exclusives (« un ouvrier saisonnier ne sait que récolter »). On modélise la notion d'incompétence / compétence par l'attachement ou non au type d'activité concerné d'une condition d'inconsistance (situation inacceptable) : « une activité de pulvérisation de fongicides dont le sujet comprend au moins un ouvrier à temps partiel est inconsistante ».

Le *système opérant* utilise ses propres procédures de prise de décision pour construire les jeux d'activités exécutables et en choisir un. Les processus dont il est doté portent sur :

- l'allocation de ressources (e.g. ouvriers, outils) en accord avec la disponibilité des ressources et les contraintes mutuelles entre elles ;
- la génération à partir d'un jeu d'activités initial de plusieurs jeux candidats lorsqu'une incompatibilité est détectée dans une tentative d'allocation ;
- la sélection du jeu d'activités préféré lorsque plusieurs demeurent ;
- la détermination des modalités (paramètres) des activités dépendant de la situation courante ;
- l'exécution du jeu choisi jusqu'au prochain changement sur la disponibilité des ressources.

Le système de production peut permettre la modélisation de plusieurs ateliers de production (e.g. un atelier d'élevage et un atelier culture) avec des ressources et des plans d'activités indépendants. On peut ainsi étendre cette possibilité pour utiliser l'environnement DIESE dans le cadre de modélisation de plusieurs exploitations, avec une hypothèse de non partage de matériel ou de main d'oeuvre.

3.2.2 La représentation de la stratégie de conduite

Pour les aspects de pilotage (figure 3.2), l'ontologie définit des particularisations des concepts d'entité, de processus et d'évènement.

L'unité basique est l'*activité*. Dans sa forme la plus simple, une activité, appelée alors *activité primitive*, est une spécialisation d'une entité. Elle spécifie « quelque chose à faire » sur une entité biophysique (par exemple une plante ou une parcelle) par un exécutant (un ouvrier, un robot ou un ensemble de ces entités). Une activité primitive est caractérisée par des *conditions d'ouverture et de fermeture*, définies par des fenêtres temporelles et/ou des *prédicats* (fonctions booléennes) qui se réfèrent à des états biophysiques ou des indicateurs. Ces contraintes servent (avec d'autres) à déterminer les activités potentiellement exécutables ou à ne plus considérer. Le « quelque chose à faire » de l'activité primitive est une transformation intentionnelle appelée *opération* (e.g. la plantation). Le changement d'état, étape par étape du système biophysique au fur et à mesure que les opérations sont réalisées, constitue un attribut fonctionnel des opérations. Le changement causé par une opération peut être instantané ou se réaliser progressivement selon une *vitesse d'exécution* (le nombre d'objets ou de surface pouvant être traité dans une unité de temps). L'exécution d'une opération est contrainte par des *conditions de faisabilité* en relation avec l'état du système biophysique.

Les activités peuvent ensuite faire l'objet de contraintes supplémentaires en utilisant des structures de programmation spécifiant des relations temporelles, des itérations, des agrégations et des exécutions optionnelles. Ces contraintes sont exprimées par des *opérateurs*, qui,

appliqués à des activités, donnent naissance à d'autres activités : les activités non primitives. Les opérateurs principaux sont : *and*, *or*, *before*, *iterate*, *optional*, *co-start*, *meet*, *overlap*. Toutes les activités sont ainsi connectées par ces opérateurs; la seule activité qui n'a pas d'activité d'un niveau plus élevé (activité mère) est le *plan nominal*. Il est possible qu'il faille spécifier pour un plan nominal des incompatibilités entre activités qui ne peuvent pas être exécutées simultanément (*contraintes sur les engagements conjoints*). Si plusieurs jeux d'activités sont candidats à l'exécution, du fait des restrictions sur l'utilisation des ressources, tout jeu ne pouvant être alloué complètement est remplacé par un ensemble de jeux contenant moins d'activités. Le choix du jeu le plus approprié se fait sur la base de *règles de préférence* qui représentent des critères divers basés, par exemple, sur des motivations de continuité dans l'exécution, sur des considérations de rentabilité ou encore d'urgence. Finalement, des adaptations de la stratégie sont possible via les *ajustements conditionnels*. La conséquence d'un ajustement conditionnel peut être n'importe quel changement sur le plan nominal (suppression ou insertion d'activités), sur les ressources à utiliser dans l'exécution de certaines activités, sur les règles opératoires attachées à une opération ou encore sur les ajustements conditionnels eux-mêmes. Son déclencheur est soit un prédicat temporel qui devient vrai dès qu'une date de référence est atteinte soit une condition relative à un état qui est satisfaite quand l'état courant correspond à la situation décrite par la condition.

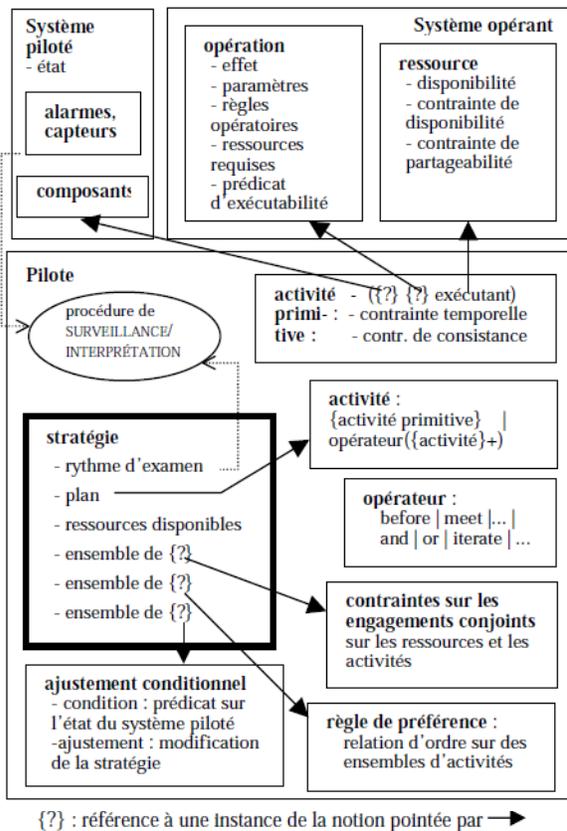


FIGURE 3.2 – Composants du pilote et principales références aux autres sous-systèmes

Au niveau opérationnel, une stratégie décrit donc de manière à la fois déclarative et procédurale le comportement que les exécutants doivent avoir pour atteindre les objectifs selon la projection du pilote. Une stratégie, plus spécifiquement son plan nominal, n'est pas simplement une séquence d'activités complètement spécifiée à l'avance comme cela est supposé dans beaucoup de modèles de systèmes de production agricole. Lors de sa construction, la stratégie doit rester assez abstraite sur quelles opérations doivent être exécutées à un instant donné, et sur quelles entités précises elles doivent porter. La programmation des opérations dépend des conditions spécifiques rencontrées au moment où l'exécution est envisagée. Il est impossible de dire à l'avance quand une opération sera exécutée, avec quelle durée et en parallèle avec quelles autres opérations. Les objets transformés par les opérations n'apparaissent pour certains qu'en cours d'exécution d'une stratégie. La partie de la stratégie correspondant à l'instant courant doit alors être expansée jusqu'à ce que soit complètement déterminé ce qu'il convient d'exécuter et comment; c'est l'essence de la procédure d'interprétation présentée dans le paragraphe suivant.

3.2.3 La mise en oeuvre de la stratégie : la procédure d'interprétation

Conduire le système de production signifie exécuter pas à pas la stratégie. La simulation de cette tâche consiste à exécuter itérativement le processus de détermination, à partir du plan, de l'ensemble d'activités primitives à exécuter et le lancement de l'exécution.

Ce processus réalise l'interprétation du programme particulier qu'est une stratégie. Il est contrôlé par des événements liés à des discontinuités particulières telles que l'examen périodique de la situation, ou un changement dans la disponibilité des ressources (absence de certains ouvriers, début d'une journée de travail). Dans un premier temps le plan nominal est visité pour mettre à jour l'état de chaque activité (c'est à dire la définir comme *ouverte*, *fermée*, *annulée*, *en attente*, etc.). Dans un deuxième temps sont formés les jeux d'activités primitives exécutables (*MakeInstructionList*). Ces jeux sont initialement constitués en prenant les activités primitives ouvertes et en tenant compte des éventuelles spécifications de disjonctions. Au sein du mécanisme d'allocation de ressources, ces jeux sont ensuite éclatés et/ou épurés si l'allocation ne parvient pas à les doter en totalité compte tenu des différentes contraintes sur les ressources et les incompatibilités entre certaines activités. Dans un troisième temps, un des jeux exécutables est choisi en fonctions des règles de préférences décrites dans la stratégie. Enfin, l'exécution est lancée en parallèle sur l'ensemble des activités primitives du jeu choisi, ce qui amène le déclenchement des règles de détermination des paramètres des opérations. L'exécution se poursuit jusqu'à ce qu'arrive un événement touchant la disponibilité de certaines ressources (par exemple, la fin d'une opération ou la fin de la journée de travail qui libère les ouvriers).

En résumé sur l'environnement DIESE, *la modélisation du comportement de conduite de la production agricole s'appuie sur la notion de stratégie qui spécifie un plan nominal sous la forme d'une organisation procédurale flexible des activités et un ensemble d'ajustements à faire en réaction à certains événements possibles*. Pour être exécutable une activité doit satisfaire des conditions temporelles, des conditions relatives à des états perçus du système de production, des contraintes de cohérence avec d'autres activités auxquelles elle est liée, et des contraintes mutuelles entre les ressources. Une fois réunies les conditions pour que l'exécution d'une activité soit reconnue licite selon le plan il faut, pour passer à l'action, déterminer certains paramètres ou modalités de l'opération qui dépendent de la situation courante au moment de l'exécution. Conformément à la réalité, l'exécution d'une stratégie dépend des facteurs incontrôlables de l'environnement extérieur (événements et entrées matérielles ou énergétiques) qui rendent impossible de calculer précisément a priori l'enchaînement d'actions, les ressources utilisées et le comportement du système biophysique. L'évaluation de l'intérêt d'une stratégie doit se faire pour une gamme de possibilités pour ces facteurs incontrôlables, principalement climatiques.

La partie suivante s'attache à présenter l'application de l'ontologie de l'environnement DIESE pour la réalisation d'un modèle pour l'action adapté à notre problématique. En préalable, il faut signaler que dans le cadre de notre démarche, on a séparé les modélisations biophysiques de la modélisation pour l'action. Par conséquent, bien que l'environnement de modélisation le permette, le modèle développé sous DIESE n'a pas pour vocation de gérer les processus biophysiques en cours dans l'agro-écosystème modélisé. Les processus biophysiques sont modélisés sous l'environnement OpenFLUID. Il sera présenté ainsi que le couplage des modèles au chapitre 9.

3.3 Résultats

3.3.1 Echelles de temps et d'espace

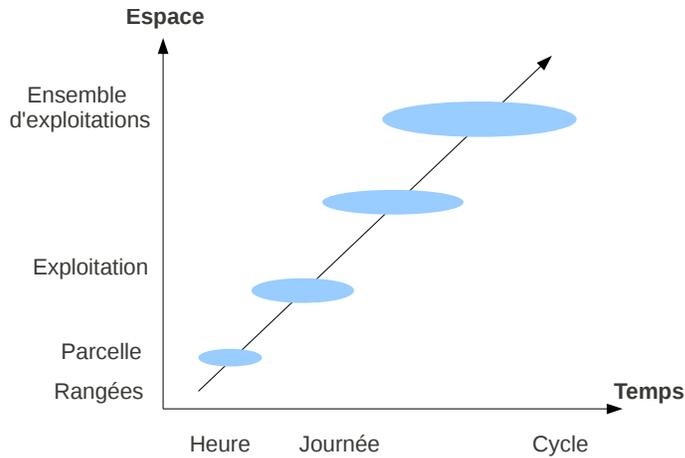


FIGURE 3.3 – Les échelles dans DHIVINE

Le modèle pour l'action développé tient compte des échelles de temps et d'espace liées conjointement à la problématique et aux processus de gestion technique. On a donc défini spatialement et temporellement des échelles emboîtées pour représenter les différents niveaux croisant un pas de temps de la décision et l'échelle spatiale de mise en oeuvre des décisions (figure 3.3).

D'un point de vue spatial, on veut représenter les actions ayant cours sur les parcelles d'un bassin versant. Le modèle pour l'action doit donc considérer un ensemble de

parcelles appartenant à des exploitations agricoles différentes. La conduite s'exprimant pour une *exploitation* entière, le modèle doit représenter l'ensemble des actions des exploitations possédant au moins une parcelle sur la zone étudiée (le bassin versant). Il doit donc rendre compte du fonctionnement de *plusieurs exploitations* en même temps. Par ailleurs, on a vu qu'en complément du niveau exploitation, l'unité de gestion principale était le lot de parcelles. Cependant, les lots de parcelles sont constitués dynamiquement en fonction des opérations culturales à réaliser et des caractéristiques permanentes ou temporaires des parcelles. De plus, la parcelle est l'objet spatial de l'action. Par conséquent, la *parcelle culturale* est définie comme l'unité spatiale du modèle. Finalement, l'organisation spatiale des parcelles en rangées définit différents lieux pour l'action : la plante, le rang, l'inter-rang. Ces *découpages spatiaux intra-parcellaires* seront donc présents dans le modèle.

D'un point de vue temporel, on définit trois échelles emboîtées. L'échelle de temps de la simulation est le *cycle cultural* soit une année. Le plan nominal correspond donc au programme d'activités pour un cycle. Le grain temporel défini pour les processus est l'*heure* : un état ne peut être modifié que toutes les heures. On définit une troisième échelle correspondant au pas de temps de la mise en oeuvre des processus techniques : *la journée*. Ce pas de temps sera donc celui des choix de mise en oeuvre tactique du plan d'activité.

3.3.2 Le système de production agricole dans DHIVINE

La structure du système de production tient compte de la représentation du fonctionnement simultané de plusieurs exploitations et du fait que le milieu biophysique est partagé par les exploitations mais que l'exploitation demeure le lieu de la décision. Les ressources sont ainsi définies comme étant propres à chaque exploitation (figure 3.4).

Dans DIESE, le système de production agricole est divisée en trois sous-systèmes :

- le pilote (*Manager*) ;
- le système opérant (*Operating System*) ;
- le système biophysique (*Controlled System*).

Dans DHIVINE le système de production s'appelle *VineProducingRegion*.

Le système bio-physique (le sol, les cultures, les parcelles, etc.) correspond à l'ensemble des territoires des exploitations agricoles qui gèrent au moins l'une des parcelles situées sur le bassin versant d'étude. C'est le *VineGrowingTerritory*.

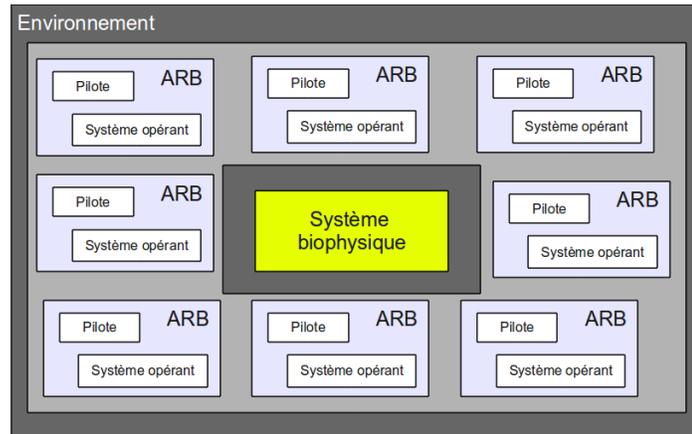


FIGURE 3.4 – Le système de production dans DHIVINE

Le pilote est celui qui gère l'ensemble du système de production. Dans DHIVINE, il est virtuel et correspond à ce qui pourrait être un gestionnaire de bassin. Il se nomme *VirtualRegionManager*. Le pilote possède une stratégie qui permet de gérer le système de production. La stratégie est un plan d'action à réaliser qui repose sur des ensembles cohérents et autonomes de ressources et de tâches (*Activities Ressources Block* ou ARB). Les ARB peuvent par exemple correspondre à des ateliers différents d'une même exploitation qui ne partageraient pas les mêmes ressources. Dans notre cas, on utilise ces ensembles pour désigner les exploitations agricoles (figure 3.4), ce sont les *VineyardActivitiesResourcesBlock*. La stratégie et les ressources de chaque exploitation sont donc définies au niveau de ces *VineyardARB*. La stratégie du gestionnaire de bassin (*Manager*) correspond donc à la somme des stratégies de chaque exploitation (*ActivitiesResourcesBlockSet*). Dans DHIVINE, le gestionnaire de bassin ne joue actuellement aucun rôle formel et ne définit pas de stratégie de gestion, il est un élément virtuel.

Le système opérant est le système qui gère les ressources en main d'œuvre et en matériel. C'est le *VirtualRegionOperatingSystem*. Il est nommé virtuel dans DHIVINE car les ressources sont propres à chaque exploitation et non pas partagées par tous.

3.3.3 Le système biophysique ou la représentation du paysage

3.3.3.1 Le parcellaire d'exploitation

Dans DHIVINE, le système contrôlé (*VineGrowingTerritory*) correspond à un système bio-physique dénommé *AgroClimaticSystem*. Son architecture est illustrée par la figure 3.5.

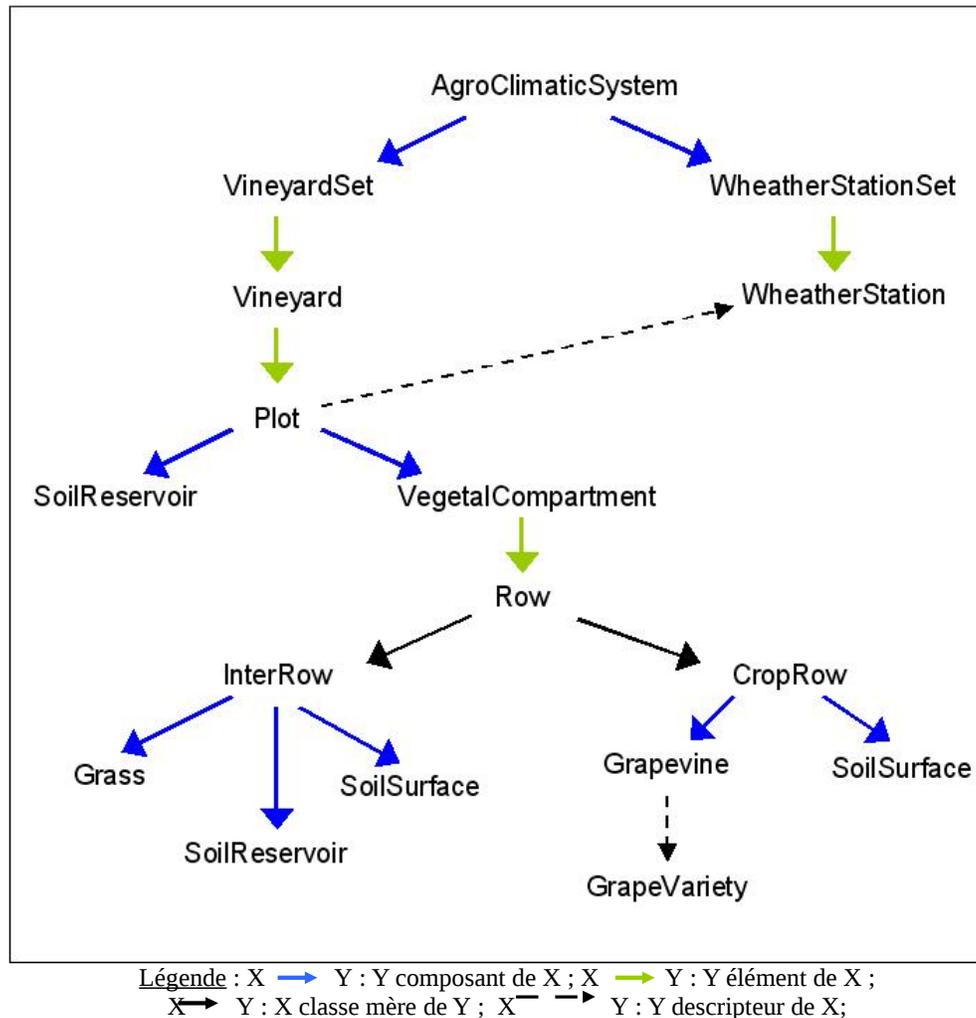


FIGURE 3.5 – Architecture du système biophysique dans DHIVINE

Du fait de la modélisation des décisions sur un territoire qui peut être étendu spatialement (même si le bassin versant étudié est petit, les parcelles des exploitations situées hors du bassin peuvent en être éloignées), le paysage est structuré par deux types d'objet :

- les exploitations agricoles étudiées (*VineyardSet*) qui peuvent constituer un paysage discontinu (figure 3.6) ;
- les zones climatiquement homogènes (*WeatherStationSet*) avec des limites dépendantes des informations climatiques disponibles et donc des stations météorologiques (*WeatherStation*) de la zone.

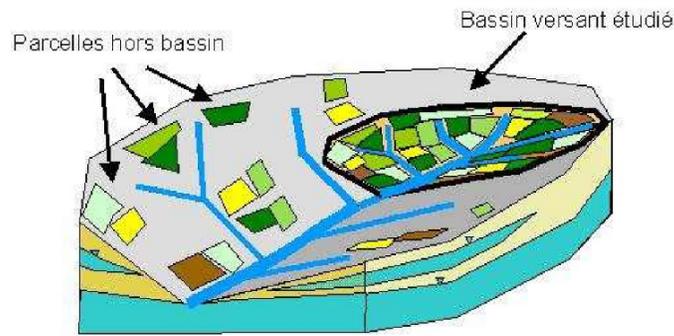


FIGURE 3.6 – Répartition spatiale des parcelles modélisées sous DHIVINE

Chaque exploitation agricole (*Vineyard*) est divisée en parcelles (*Plot*). Chaque parcelle possède une liste de descripteurs utilisés pour constituer les lots de parcelles redevables d'actions différentes ou à des moments différents :

- une commune de rattachement (*Village*) ;
- un lieu-dit (*PlaceName*) ;
- des coordonnées géographiques (*Latitude*, *Longitude*) ;
- une surface (*Area*) ;
- une occupation du sol (*LandUse*) ;
- un type de sol en terme pédologique (*SoilType*) ;
- un pourcentage de couverture du sol par les cailloux (*Stoniness*) ;

et dans le cas d'une parcelle de vigne

- un écartement entre rangées de vignes (*AlleyWidth*) ;
- un écartement entre pieds de vigne sur la rangée (*PlantSpacing*) ;
- une année de plantation (*YearOfPlantation*) ;
- un système de taille (*PruningMode*) ;
- un système de palissage (*TrellisMode*) ;
- un cépage (*GrapeVarietyAttribute*).

Chaque parcelle est rattachée à la station météo la plus proche par le descripteur *WeatherStationAttribute*. Chaque station météo possède des coordonnées géographiques, on effectue donc un calcul des distances entre la parcelle et les stations météorologiques disponibles pour définir ce descripteur *WeatherStationAttribute*.

La structure de la parcelle se base sur la structure définie dans le modèle VERDI (Ripoche, 2009). Chaque parcelle est définie par deux entités :

- le compartiment végétal (*VegetalCompartment*) ;
- le sol (*SoilReservoir*).

Du fait de la disposition de la culture en rangées et pour représenter les différents lieux des actions dans une parcelle, le compartiment végétal est structuré par des rangées (*Row*). Les inter-rangs (*InterRow*) et les rangs (*CropRow*) constituent des spécialisations des rangées (*Row*).

Le rang de vigne (*CropRow*) est composé :

- de vigne (*Grapevine*) caractérisée par un cépage (*GrapeVariety*) ;
- d'une couche superficielle de sol (*SoilSurface*).

L'inter-rang (*InterRow*) est composé :

- de l'herbe (*Grass*) qu'elle soit constitutive d'un enherbement souhaité ou non ;
- d'une couche superficielle de sol (*SoilSurface*) ;
- d'un réservoir de sol accessible à l'herbe (*SoilReservoir*).

Le sol (*SoilReservoir*) défini pour chaque parcelle correspond à l'ensemble du réservoir sol (en incluant donc le réservoir défini pour l'herbe).

Quatre types de rangées (*Row*) ont été définis :

- deux types d'inter-rangs (*InterRow*) ;
- deux types de rangs (*Row*).

En effet, l'entretien du sol des parcelles de vigne n'est pas souvent homogène à l'échelle de la parcelle. On observe plutôt une gestion séparée des rangs et des inter-rangs avec parfois deux types d'entretien du sol pour les inter-rangs. Par exemple, les rangs d'une parcelle peuvent être entretenus par désherbage chimique, 2 inter-rangs sur 3 par travail du sol et 1 inter-rang sur 3 par enherbement permanent (figure 3.7).

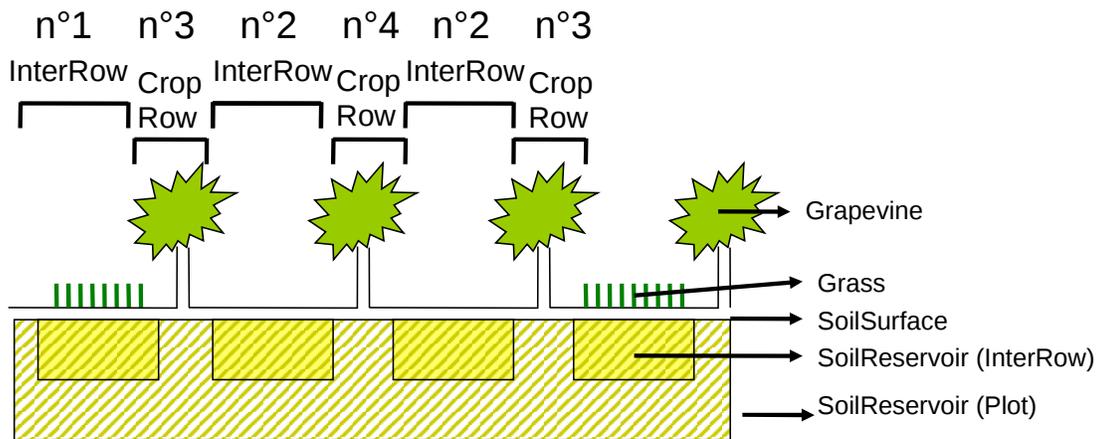


FIGURE 3.7 – Structure de la parcelle dans DHIVINE

Du fait de cette gestion à l'échelle intra-parcellaire, il est nécessaire d'identifier autant de types de rangées qu'il peut y avoir de gestions différentes d'entretien du sol, chaque type de rangée étant soumis à des règles pour l'action et à un comportement bio-physique propre. On observe régulièrement deux modalités d'entretien du sol pour les inter-rangs, c'est pourquoi sont définis deux types d'inter-rangs. En conséquence, deux types de rangs ont également été défini pour tenir compte des différences bio-physiques liées au voisinage d'inter-rangs entretenus différemment.

Chaque type de rangée est ainsi défini selon ses spécificités vis-à-vis des processus décisionnels et bio-physiques (tableau 3.1). Une parcelle comprend obligatoirement une surface non nulle pour au moins un type de rang et au moins un type d'inter-rang. On distingue les inter-rangs stabilisés (Row n°1) des inter-rangs travaillés (Row n°2) (figure 3.7). Les inter-rangs travaillés, comme leur nom l'indique, sont entretenus par travail du sol seul ou associé à du désherbage chimique. Les inter-rangs stabilisés, à l'opposé, ont pour vocation d'être peu ou pas travaillés. Ils peuvent être entretenus par enherbement ou par désherbage chimique seul ou associé à du travail du sol.

Un type d'entretien du sol est donc commun aux deux types d'inter-rangs : le désherbage chimique associé au travail du sol. En effet, l'ensemble des inter-rangs peut être soumis à cet entretien du sol mais une partie des inter-rangs peut recevoir plus de travail du sol (inter-rang travaillé) que l'autre (inter-rang stabilisé). La distinction entre inter-rang travaillé et stabilisé est donc liée aux types d'entretien et/ou aux modalités de mise en œuvre de ces entretiens. Dans le cas de deux types d'entretien du sol des inter-rangs, on compare donc les deux types pour distinguer les inter-rangs stabilisés des inter-rangs travaillés, les derniers étant ceux qui reçoivent le plus de travail du sol.

Les rangs vont a priori tous subir le même entretien du sol mais en fonction de l'entretien du sol des inter-rangs voisins frontaliers les processus d'évapo-transpiration vont différer. Cette différence n'est actuellement pas prise en compte par le modèle qui gère ces processus mais pour permettre une prise en charge future, deux types de rangs ont été distingués : le rang situé entre deux inter-rangs travaillés (Row n° 4) et le rang voisin frontalier d'au moins un inter-rang stabilisé (Row n°3) (figure 3.7).

TABLE 3.1 – Les différents types de rangées de la parcelle de vigne dans DHIVINE

Row n°	Type de rangées	Commentaires
1	Inter-rang stabilisé	Inter-rang recevant le moins de travail du sol et pouvant être entretenu par : – enherbement ; – désherbage chimique ; – désherbage chimique combiné avec du travail du sol
2	Inter-rang travaillé	Inter-rang recevant le plus de travail du sol et pouvant être entretenu par : – travail du sol seul ; – désherbage chimique combiné avec du travail du sol
3	Rang voisin frontalier d'au moins un inter-rang stabilisé	
4	Rang voisin frontalier de deux inter-rangs travaillés	

Finalement, pour décrire le motif créé par les rangées, trois descripteurs supplémentaires de la parcelle (*Plot*) ont été définis :

- *RidingOrientedInterRowProportion* qui définit la proportion d'inter-rang stabilisés ;
- *GrassStripAlleyWidthRatio* qui est le ratio de la largeur de la bande enherbée sur la largeur entre rangs, ce paramètre ne vaut que si des inter-rangs sont entretenus par enherbement ;
- *CropRowAlleyWidthRatio* qui est le ratio de la largeur d'un rang n°4 sur la largeur entre rang.

Dans notre exemple (figure 3.7), *RidingOrientedInterRowProportion* vaut $1/3$. Si on considère que l'exemple concerne des parcelles avec un écartement entre rang de 2,5m et que la bande enherbée est de 1,5m de large alors *GrassStripAlleyWidthRatio* vaut 0,6. Si, en complément, on considère que la largeur de la bande travaillée (dans les row n°2) est de 2m, alors *CropRowAlleyWidthRatio* vaut 0,2.

Dans ce cas, on voit que la largeur du rang (*CropRow*) est différente selon que

- le rang est entre deux inter-rangs travaillés (row n°4) où sa largeur sera de 50cm ;
- le rang est entre un inter-rang stabilisé et un travaillé (row n°3) où sa largeur sera de 75cm (25cm du côté de l'inter-rang travaillé plus 50cm du côté de l'inter-rang enherbé).

La représentation spatiale explicite dans le modèle permet ainsi de tester l'effet de différents motifs intra-parcellaires d'entretien du sol comme on va le voir au paragraphe suivant.

TABLE 3.2 – Les différentes stratégies d'entretien du sol dans DHIVINE

Stratégies d'entretien du sol	Modalités d'entretien du sol	
	Pour les parcelles d'écartement entre rangs ≥ 200 cm	Pour les parcelles étroites
Désherbage chimique (<i>TotalChemicalWeedingStrategy</i>)	Inter-rang stabilisé : CHEMICAL_WEEDING ; Inter-rang travaillé : NONE ; Rang : CHEMICAL_WEEDING ;	pour toutes les stratégies
Combinaison dans le temps de désherbage chimique et de travail du sol (<i>TillagePlusChemicalWeedingInTimeStrategy</i>)	Inter-rang stabilisé : MIXED_TILLAGE_CW ; Inter-rang travaillé : NONE ; Rang : CHEMICAL_WEEDING ;	
Combinaison dans l'espace de désherbage chimique et de travail du sol (<i>TillagePlusChemicalWeedingInSpaceStrategy</i>)	Inter-rang stabilisé : CHEMICAL_WEEDING ; Inter-rang travaillé : TILLAGE ; Rang : CHEMICAL_WEEDING ;	
Travail du sol (<i>TillageStrategy</i>)	Inter-rang stabilisé : NONE ; Inter-rang travaillé : TILLAGE ; Rang : CHEMICAL_WEEDING ;	
Combinaison dans l'espace d'enherbement et de travail du sol (<i>InterRowGrassCoveringStrategy</i>)	Inter-rang stabilisé : GRASS_COVER ; Inter-rang travaillé : TILLAGE ; Rang : CHEMICAL_WEEDING ;	

3.3.3.2 La distribution des modalités d'entretien du sol sur les parcelles

On a vu lors de l'analyse des processus de gestion technique que les viticulteurs attribuent des modalités d'entretien du sol aux parcelles de l'exploitation selon différentes stratégies. Les différentes stratégies d'entretien enquêtées ont été listées au chapitre précédent :

- une stratégie basée sur le désherbage chimique ;
- une stratégie basée sur une combinaison dans le temps de travail du sol et de désherbage chimique ;
- une stratégie basée sur une combinaison dans l'espace de travail du sol et de désherbage chimique ;
- une stratégie basée sur le travail du sol ;
- une stratégie basée sur une combinaison dans l'espace de l'enherbement et du travail du sol.

La stratégie est une combinaison flexible de modalités d'entretien du sol des rangs et des inter-rangs. Les différentes modalités possibles à l'échelle de la rangée et qui sont les valeurs de l'attribut *SoilManagementModality* de la rangée (Row) sont :

- le travail du sol (TILLAGE) ;
- le désherbage chimique (CHEMICAL_WEEDING) ;
- le désherbage chimique associé au travail du sol (MIXED_TILLAGE_CW) ;
- l'enherbement (GRASS_COVER) ;
- aucune (NONE).

Cette dernière modalité a été définie pour être attribuée éventuellement aux types de rangées non présentes dans la parcelle (cf 3.1). Le tableau 3.2 illustre les différentes distributions de modalités d'entretien du sol présentes dans DHIVINE.

La combinaison des modalités d'entretien du sol des rangées et des descripteurs de la parcelle qui définissent la proportion des inter-rangs stabilisés (*RidingOrientedInterRowProportion*) et les largeurs des bandes enherbées (*GrassStripAlleyWidthRatio*) et des rangs (*CropRowAlleyWidthRatio*), permet de définir les motifs intra-parcellaires (e.g. un motif constitué d'un enherbement 1 inter-rang sur 3 et de travail du sol 2 inter-rangs sur 3).

Chaque exploitation (*VineyardARB*) possède un descripteur *PlotInternalPatternSetAttribute* qui définit les différents jeux de paramètres (*RidingOrientedInterRowProportion* ; *GrassStripAlleyWidthRatio* et *CropRowAlleyWidthRatio*) en fonction des lots de parcelles. Il est donc possible en s'appuyant sur les caractéristiques des parcelles de définir différents motifs spatiaux pour une même combinaison d'entretien du sol. Par exemple, pour une parcelle entretenue par alternance d'inter-rangs enherbés et travaillés, on peut définir une fréquence plus ou moins grande d'inter-rangs enherbés et des largeurs différentes de la bande enherbée de l'inter-rang selon l'écartement entre rangs de la parcelle.

En conclusion on s'est attaché à décrire l'ensemble des objets bio-physiques et leurs caractéristiques correspondants aux différentes unités de gestion et lieux d'action (exploitation, parcelle, rangée, groupe de parcelles par cépage ou écartement, . . .) des viticulteurs.

3.3.4 L'environnement dans DHIVINE

On présente ici les deux facteurs incontrôlables qui pèsent sur le système de production dans DHIVINE : le climat et le développement des maladies.

3.3.4.1 Le climat

Le climat est une composante bio-physique primordiale du système représenté. En effet, le modèle DHIVINE étant un modèle déterministe, à conduites techniques égales, ce sont bien les différences de climat qui vont provoquer des différences de répartition spatio-temporelle des actions des viticulteurs en imposant des contraintes différentes. On a évoqué que le modèle DHIVINE était focalisé sur les processus de gestion technique et non biophysiques. Cependant compte tenu de l'importance des informations climatiques pour la mise en oeuvre des actions, on a conservé une représentation du climat à l'intérieur du modèle.

Actuellement la seule information climatique gérée par DHIVINE est la pluviométrie horaire. A chaque station météo (*WeatherStation*) doit correspondre un fichier de données climatiques.

Les fichiers climatiques sont définis dans DHIVINE comme de la classe *HourlyWeatherFile*. Ce sont des fichiers de type *BufferizedDataFile*, c'est à dire que ce sont des fichiers sur lesquels on a la possibilité de disposer d'une mémoire tampon dans le passé et de prédictions dans le futur. Ainsi deux méthodes sont associées au fichier *HourlyWeatherFile* :

- *AssignSetMemoryScope* pour garder en mémoire des données passées ;
- *AssignSetPredictionScope* pour disposer de données futures.

Cette propriété du fichier climatique correspond à la mémoire des viticulteurs concernant le climat passé et aux prédictions climatiques dont ils disposent pour le futur. Dans les deux cas une période de 3 jours a été choisie. Pour le cas spécifique des prédictions, il faut considérer que le viticulteur a accès à des prédictions certaines puisque le fichier utilisé est le fichier décrivant le climat qui a effectivement eu lieu.

La lecture des informations climatiques est liée au processus *HourlyWeatherFileReading* qui se déroule toutes les heures.

La gestion de fichier climatique dans DHIVINE permet donc de représenter la connaissance que les viticulteurs ont de la pluviométrie pour la journée mais également la mémoire qu'ils en ont gardée et les prédictions qu'ils estiment fiables. A l'avenir, compte tenu de l'importance de la prise en compte du vent pour les opérations de pulvérisation, il serait opportun que ce paramètre soit intégré et pris en compte dans le modèle.

3.3.4.2 L'état sanitaire des vignes

Dans le cadre des opérations de protection phytosanitaire, l'état sanitaire de la vigne est un indicateur important pour la décision. Cependant sa modélisation n'est pas chose aisée et bien que la protection phytosanitaire soit une question centrale de notre problématique, inclure des modèles de développement de bio-agresseurs dans le couplage se serait avéré trop chronophage dans le cadre du travail de thèse. De plus, la vigne subit majoritairement des épidémies (mildiou, oïdium,...) dans le cas desquelles la seule observation d'un parcellaire d'exploitation plus ou moins éclaté est insuffisante voire difficile (manque de temps, difficultés d'observation des symptômes,...) sans compter que dans notre cas d'étude, on se situe majoritairement dans une protection phytosanitaire gérée de manière préventive. Les viticulteurs cherchent donc à

bénéficier d'informations plus globales sur le développement des épidémies ou sur la présence locale des bio-agresseurs pour agir au moment opportun. Ainsi ils récupèrent des informations chez les vendeurs de produits phytosanitaires, participent à des groupes d'observations ou s'abonnent à des bulletins d'avertissements agricoles. Cette dernière source est la seule écrite facilement accessible, archivée et disponible. C'est donc celle qui a été exploitée dans DHIVINE.

Le bulletin utilisé est le bulletin Performance Vigne® publié par la Chambre d'Agriculture de l'Hérault. L'objectif déclaré du bulletin est : « ... de fournir les informations nécessaires à la mise en œuvre de la conduite raisonnée sur l'exploitation. Les éléments de situation générale et de stratégie de lutte, confrontés aux observations des viticulteurs, permettront à partir des règles de décision fournies, de décider de l'opportunité et des modalités d'intervention sur les parcelles. » Compte tenu de l'orientation du bulletin pour la lutte raisonnée, les informations exploitées pour DHIVINE se sont cantonnées aux résultats de modélisation des risques et aux données biologiques observées sur les parcelles de référence. Actuellement seules les luttes contre l'oïdium et le mildiou, principaux bio-agresseurs de la vigne, sont représentées dans DHIVINE. Les indicateurs utilisés et issus du bulletin sont donc :

- pour l'oïdium : la présence de symptômes (appelés drapeaux) et le niveau d'attaque (observé sur des parcelles références de la zone agro-climatique) ;
- pour le mildiou : l'observation de foyers primaires dans la zone agro-climatique, le niveau d'attaque et l'indice de risque (donnée issue du modèle MILSTOP).

La lecture des informations du fichier est réalisée grâce au processus *InitPestInfoFileReading* lancé tous les matins.

Il n'y a donc pas de modélisation formelle de l'état sanitaire des vignes mais les indicateurs pour la décision proviennent d'un bulletin d'avertissement utilisé couramment par les viticulteurs en complément de leurs observations. Dans DHIVINE, on exploite donc une seule source d'information globale. En ce qui concerne les opérations de protection de type préventive, cette information associée avec d'autres utilisées par les viticulteurs (prévisions climatiques, état de développement de la vigne,...) semble suffisante pour la représentation des actions. Par contre, elle est très limitée quand il s'agit d'avoir un indicateur pour les actions de traitement curatif notamment quand ces actions ne sont censées concerner que les parcelles présentant des symptômes. Par conséquent, plus la stratégie de protection phytosanitaire se rapproche d'une stratégie intégrée, plus l'information actuellement utilisée s'avère insuffisante comme indicateur pour la représentation des actions.

3.3.5 Le système opérant dans DHIVINE : les ressources

Les enquêtes nous ont montré que l'organisation du travail et plus généralement les processus d'allocation des ressources avaient une influence conséquente sur le calendrier des actions culturales (Rellier et al., 2011). On a pu constater qu'il existait des contraintes conséquentes liées à la main d'oeuvre (nombre, qualité, disponibilité) et à la gestion du matériel par rapport aux différentes caractéristiques des parcelles. Compte tenu que l'on modélise plusieurs exploitations, on a donc défini une typologie de ressources. Les ressources sont ainsi classées selon leur fonction ou leur compétence.

L'ensemble des ressources de chaque exploitation est constitué par attribution d'un ensemble de ressources (*MultipleResourcePool*) à chaque exploitation (*VineyardARB*). Cet ensemble de ressources est constitué de deux sous-ensembles de ressources (*SimpleResourcePool*) :

- un pour la main d'œuvre (*FarmWorker*) ;
- un pour le matériel (*FarmEquipment*).

3.3.5.1 La main d'oeuvre

On présente ici les différents types ainsi que la manière de définir la disponibilité des ressources en main d'oeuvre.

Les compétences À partir des enquêtes réalisées en exploitation, différents types de travailleurs ont été définis en fonction de leur compétence. Les différents types dépendent de deux grandes classes :

- les travailleurs permanents (*PermanentFarmWorker*) qui peuvent effectuer tout ou partie des opérations culturales mais qui sont présents et mobilisés tous les ans ;
- les travailleurs non permanents (*NonPermanentFarmWorker*) qui n'effectuent qu'une partie des opérations culturales et qui ne sont mobilisés qu'en cas de besoin (en se basant sur l'avancement d'une opération culturale), ils sont considérés comme vacataires.

Les travailleurs permanents Trois sous-classes existent :

- les travailleurs manuels stricts (*PermanentManualFarmWorker*) ;
- les tractoristes stricts (*PermanentTractorDriver*) ;
- les travailleurs à compétences multiples : tractoriste et manuel (*PermanentMultiTaskWorker*).

Les travailleurs manuels ont 3 types de compétences :

- réalisation de l'ensemble des tâches manuelles (*PermanentMultiTaskManualWorker*) ;
- réalisation de la taille uniquement (*PermanentPruner*) ;
- réalisation des travaux en vert uniquement (*PermanentVegetationGrower*) soit le relevage et l'épamprage manuel.

Les tractoristes stricts ne peuvent avoir qu'un type de compétence : la réalisation de travail du sol (*PermanentTillageTractorDriver*).

Les travailleurs à compétences multiples : manuel et tractoriste ont 3 types de compétences :

- réalisation de l'ensemble des tâches manuelles et motorisées (*PermanentAllTaskTractorDriver*) ;
- réalisation de l'ensemble des tâches manuelles et motorisées mais avec une orientation sur les tâches motorisées quand il y en a (*PermanentPreferentialTractorDriver*) ;
- réalisation de l'ensemble des tâches manuelles mais seulement du travail du sol concernant les tâches motorisées (*PermanentTillageOrientedTractorDriver*).

Les travailleurs non permanents La mobilisation des travailleurs non permanents reste à définir mais deux types de compétences sont possibles :

- réalisation de tâches manuelles (*NonPermanentManualFarmWorker*) ;
- réalisation de tâches motorisées (*NonPermanentTractorDriver*).

Les périodes et horaires de travail

Les calendriers de travail de base Dans DHIVINE, quatre types de calendriers existent :

- *ManagerAnnualEmploymentPlan* pour le chef d'exploitation qui toute l'année réalise des semaines de travail de six jours ;
- *StandardWorkerAnnualEmploymentPlan* pour les travailleurs « standards » qui réalisent des semaines de travail de cinq jours avec des horaires de travail normaux ;
- *SpecialWorkerAnnualEmploymentPlan* pour les tractoristes qui en période de traitements peuvent travailler les week-end et faire des horaires de nuit ;
- *RetiredWorkerAnnualEmploymentPlan* pour les retraités qui réalisent toute l'année des semaines de travail de cinq jours avec des horaires journaliers réduits.

Les périodes et horaires de travail sont définis par les calendriers de travail (*AnnualEmploymentPlan*). Ces calendriers sont, en effet, composés d'une succession de sous-calendriers relatifs à une période donnée : les *SeasonalEmploymentPlan*. Ces sous-calendriers permettent de définir des horaires de travail différents en fonction de la période de l'année suivant des contraintes de durée du jour, de type et de quantité de travail à réaliser. Par exemple, en hiver les viticulteurs ne travaillent pas de nuit mais en été, ils peuvent justement réaliser des traitements phytosanitaires de nuit.

Dans DHIVINE est défini un découpage unique en 5 périodes qui s'applique à toute la main d'œuvre :

- du 1er septembre jusqu'au jour du passage à l'heure d'hiver (*SeptemberOctoberEmploymentPlan*) ;
- du lendemain du passage à l'heure d'hiver jusqu'au 31 janvier (*NovemberJanuaryEmploymentPlan*) ;
- du 1er février jusqu'au jour du passage à l'heure d'été (*FebruaryMarchEmploymentPlan*) ;
- du lendemain du passage à l'heure d'été jusqu'au 30 avril (*AprilEmploymentPlan*) ;
- du 1er mai jusqu'au 31 août (*MayAugustEmploymentPlan*).

Les horaires de travail pour chacune de ces périodes (*SeasonalEmploymentPlan*) sont obtenus par la répétition de l'organisation hebdomadaire définie par deux classes :

- *RecurrentAvailabilityTimeTable* qui définit les jours travaillés sur une semaine de 7 jours ;
- *AvailabilityTimeSlot* (élément de *RecurrentAvailabilityTimeTable*) qui définit une période de travail, elle est spécifiée par un moment de début et un moment de fin (heures de commencement et de fin du travail).

Il y a deux spécialisations de la classe *AvailabilityTimeSlot* :

- *WeekDayMorning* qui définit la période de travail pour la matinée ;
- *WeekDayAfternoon* qui définit la période de travail pour l'après-midi.

Dans DHIVINE sont définies trois spécialisations de *RecurrentAvailabilityTimeTable* pour des semaines comprenant cinq (*PermanentFarmWorkerFiveDayTimetable*), six (*PermanentFarmWorkerSixDayTimetable*) ou sept jours de travail (*PermanentFarmWorkerSevenDayTimetable*).

Pour définir différents horaires de travail journalier (différentes valeurs pour les *AvailabilityTimeSlot*), il existe des spécialisations des plannings de travail périodiques. Par exemple, pour le *MayAugustEmploymentPlan*, on trouve un planning avec des horaires normaux (8-12h ; 14-19h), réduits (8-11h ; 14-18h) et étendus (3-12h ; 14-19h).

En résumé un calendrier de travail (*AnnualEmploymentPlan*) est une séquence de cinq sous-calendriers (*SeasonalEmploymentPlan*) chacun caractérisé par un type de semaine de travail (*RecurrentAvailabilityTimeTable*) de 5 à 7 jours associé à des horaires de travail journaliers (*AvailabilityTimeSlot*) définis par demi-journée, ces derniers pouvant être normaux, réduits ou étendus en fonction du type de sous-calendrier choisi.

Un calendrier de travail (*AnnualEmploymentPlanAttribute*) est attribué à chaque travailleur (*FarmWorker*) selon ses compétences et son statut.

Trois statuts du travailleur sont définis dans DHIVINE :

- plein-temps (*FullTime*), le travailleur réalise alors des horaires pleins et des semaines pleines ;
- partiel (*PartTime*), le travailleur est à temps partiel au niveau des horaires et/ou des jours travaillés, ce statut correspond à la situation de pluriactif ;
- retraité (*Retired*), le travailleur est à temps plein mais avec des horaires de travail plus léger, ce statut correspond à la situation de retraité cultivant une petite surface de vigne (< 10 ha).

Par ailleurs on attribue la qualité de chef d'exploitation à l'un des travailleurs. L'objectif est de pouvoir lui attribuer des horaires de travail particuliers.

Flexibilité des horaires de travail Les heures de fin de demi-journée de travail peuvent être modulées en fonction de la durée des activités que l'on s'apprête à démarrer ou de la durée théorique restante pour terminer une activité en cours :

- si une activité en cours peut être terminée dans la demi-journée avec une rallonge de travail alors on repousse l'heure de fin jusqu'à l'heure spécifiée par les descripteurs 'horaire étendu de fin de matinée' (*MorningExtendedHour*) et 'horaire étendu de fin de journée' (*AfternoonExtendedHour*) définis en fonction des périodes (*SeasonalEmploymentPlan*) ;
- si l'heure de démarrage d'une activité est trop tardive pour en réaliser une partie suffisante avant la fin de la demi-journée, alors on ne la démarre pas et les unités de main d'œuvre seront affectées à une autre activité plus courte ou bien libérées de tout travail.

Les jours fériés et jours de congés Il s'agit des jours, ouvrables ou non, lors desquels l'unité de main d'œuvre n'est pas disponible pour le travail.

L'option a été prise d'individualiser la liste de ces journées en fonction des compétences et du statut du travailleur. En effet, le chef d'exploitation peut travailler les jours fériés, et le nombre de ses jours de congés est inférieur à celui des autres unités de main d'œuvre. Les employés aux traitements phytosanitaires peuvent travailler les jours fériés dans la période de pointe de ces travaux.

Tout calendrier de travail (*AnnualEmploymentPlan*) est donc caractérisé par un descripteur *OffWorkCalendarAttribute* qui définit le calendrier des jours non travaillés.

Chaque calendrier *OffWorkCalendar* possède des éléments *OffWorkSinglePeriod* qui permettent de définir les jours ou les périodes non travaillés par deux descripteurs :

- *BeginningCalendarDate*, définissant le début de la période ou le jour unique non travaillé ;
- *EndCalendarDate*, définissant la fin de la période non travaillée.

Contraintes sur le cumul des heures travaillées En agriculture, les horaires de travail doivent être flexibles en fonction de la saison et des travaux à réaliser. En conséquence, les horaires définis dans les *SeasonalEmploymentPlan* doivent parfois être plus larges pour

définir la période durant laquelle une main d'œuvre peut travailler plus tôt que la période réelle de travail. C'est plus particulièrement le cas pour les employés réalisant les traitements phytosanitaires et qui doivent pouvoir travailler de nuit s'il y a un traitement à réaliser mais aussi de jour dans le cas contraire. De plus, on a rendu plus flexibles les horaires en permettant de dépasser l'heure de fin de travail théorique pour finir une activité en cours et ceci en donnant des flexibilités plus larges pour les périodes de pointe. En conséquence, l'intégration de ces flexibilités peut entraîner un temps de travail cumulé dépassant le nombre d'heures de travail légalement autorisé. Pour contrôler ces éventuels dépassements des contraintes sur le cumul des heures travaillées ont été mis en place.

En théorie, concernant le nombre d'heures travaillées, dans l'agriculture :

- à la journée, la limite est à 12h maximum dans la limite de 25 jours par an et 6 jours consécutifs, sinon la limite est à 10h ;
- à la semaine, la limite est à 48h avec obligation de ne pas dépasser 44h en moyenne sur une période de 12 semaines consécutives ;
- à l'année, la limite est à 1600h sans heures supplémentaires avec 30 jours ouvrables de congés payés et 11 jours fériés légaux, il est possible d'ajouter de 340 à 400h supplémentaires payées ou transformées en repos compensateur selon qu'1h supplémentaire équivalait à 1h15 de repos compensateur.

Dans DHIVINE, il n'a pas été prévu de gestion de l'allocation des ressources en main d'œuvre en fonction du cumul d'heures travaillées sur une période donnée, le seul levier de gestion est de rendre indisponible un travailleur s'il dépasse une limite d'heure fixée sur une période donnée. On choisit donc de positionner des contraintes au niveau journalier et hebdomadaire.

Les limites sont positionnées à 40h par semaine et 8h par jour en conditions standards. Pour le cas des tractoristes en période estivale, les limites sont portées à 48h par semaine et 11h par jour. Ces limites sont définies comme des descripteurs des travailleurs (*Farm Worker*) :

- *WorkingTimeDailyUpperBound* pour la limite journalière ;
- *WorkingTimeWeeklyUpperBound* pour la limite hebdomadaire.

Deux autres descripteurs variables des travailleurs (*Farm Worker*) décomptent le nombre d'heures encore disponibles pour la journée (*WorkingTimeDailyLeft*) et pour la semaine (*WorkingTimeWeeklyLeft*). Un travailleur est alors déclaré indisponible si les valeurs des descripteurs passent à 0. Il est ensuite rendu de nouveau disponible quand il se voit réattribuer un quota d'heures c'est-à-dire le lendemain ou la semaine suivante en fonction de la limite dépassée (journalière ou hebdomadaire).

3.3.5.2 Le matériel

Le matériel est réparti en 5 classes correspondant à des matériels de fonctions et/ou de caractéristiques différentes.

Pour définir les différents types de matériel on s'est basé :

- sur les effets qu'ils pouvaient avoir vis-à-vis de la répartition spatio-temporelle des actions culturales ;
 - soit via l'allocation de ressources (selon la nécessité à distinguer deux types de matériel pour prendre en compte les contraintes sur les ressources) ;
 - soit via la réalisation des actions (vitesse, conditions de faisabilité) ;
- sur les effets qu'ils pouvaient avoir sur les variables de pression (suivant les modifications différentes de l'infiltrabilité et de la concentration de matières actives au sol que créent deux types de matériel).

Les différentes classes de matériels dans DHIVINE sont :

- le matériel de traction de la classe *Tractor* ;
- le matériel de pulvérisation de la classe *Tank* (cuve) et de la classe *Sprayer* pour laquelle existent 6 sous-classes :
 - *BackSprayer* : pulvérisateur à dos ;
 - *HorizontalSprayer* : rampe horizontale pour pulvérisation au sol ;
 - *VerticalSprayer* : rampe verticale pour pulvérisation sur feuillage ;
 - *HanHeldSprayGun* : lance à main ;
 - *DebranchingSprayer* : épampreuse chimique ;
 - *AirAssistedSprayer* : pulvérisateur pour traitement phytosanitaire de type canon, aéro-convecteur ou pneumatique ;
- le matériel de travail du sol de la classe *Tillage Tool* pour laquelle existent 2 sous-classes :
 - *RotaryCultivator* : outil rotatif ;
 - *SpringTineCultivator* : outil à dents qui inclut cadre, spiroculteur, actisol, vibroculteur, cultivateur ;
- le matériel de broyage pour laquelle existe 1 classe :
 - *Grinder* : broyeur qui inclue girobroyeur, broyeur à marteaux et broyeur hors-sol ;
- le matériel tracté autre pour lequel existent 5 sous-classes :
 - *Clipper* : écimeuse/rogneuse ;
 - *CollectorPane* : panneaux collecteur utilisés pour diminuer les pertes lors de pulvérisations ;
 - *PruningMachine* : machine à tailler ;
 - *TrellisingMachine* : machine à palisser ;
 - *Spreader* : épandeur d'engrais.

3.3.5.3 Les contraintes sur les ressources

Des contraintes sont définies sur les ressources pour éviter des situations impossibles, ce sont les *ResourceSharingViolationCondition*.

Dans DHIVINE trois situations impossibles sont définies :

- l'utilisation du même matériel à deux endroits différents (*EquipmentMultiLocalization*) ;
- l'ubiquité d'un travailleur (*Farm WorkerMultiLocalization*) ;
- la réalisation, par un travailleur, de plusieurs activités simultanément (*Farm Worker-MultiOccupation*).

Ces contraintes sont définies au niveau du système opérant car partagées par toutes les exploitations mais il est envisageable de les positionner ou d'en ajouter de spécifiques au niveau des exploitations.

Une contrainte est également positionnée sur les engagements conjoints sur les ressources et les activités, c'est une *ActivitiesResourcesInconsistentCommitment*. Elle a pour objectif d'empêcher la réalisation simultanée de plusieurs opérations dans une parcelle (*PlotWith-SeveralOperations*).

Les contraintes ne bloquent pas la réalisation de tâches combinées (exemple : un travail du sol combiné à un écimage), il faut dans ce cas définir une activité correspondant à l'activité combinée. On verra plus loin que la définition d'une nouvelle activité est de toute façon nécessaire dès que les ressources nécessaires à sa réalisation ou sa vitesse change.

3.3.6 De l'activité au plan : la construction de la stratégie de conduite dans DHIVINE

On a présenté la structure du système biophysique, du système opérant et de l'environnement dans DHIVINE. On présente maintenant la structure du pilote incarnée par la stratégie de conduite.

La stratégie de conduite spécifie la façon flexible d'organiser les activités, les adaptations qu'elle doit subir lorsque certains événements se produisent, et les principes à respecter par le système opérant pour établir précisément les actions à exécuter. Elle définit aussi le rythme auquel le pilote doit l'examiner. On présente dans la suite comment a été construite la stratégie de conduite dans DHIVINE en s'appuyant sur l'ontologie de DIESE. On présentera ensuite comment cette stratégie est appliquée pour la modélisation.

3.3.6.1 Rappel sur l'ontologie

Selon l'ontologie de DIESE, on utilise la notion d'*activité primitive* pour modéliser les opérations culturelles à réaliser.

Une activité primitive est dépendante de conditions d'ouverture et de fermeture et elle est constituée de 3 composants :

- l'objet opéré ;
- l'opération (action avec sa spécification de matériel requis) ;
- l'exécuteur (main d'œuvre allouée).

L'*objet opéré* correspond à l'entité bio-physique qui est l'objet de l'action, ce peut être la parcelle ou dans DHIVINE, ce peut être par exemple la partie inter-rang d'un des deux couples (rang/inter-rang).

L'*opération* est liée à un matériel, une vitesse et un effet et n'est possible que si ses conditions de faisabilité sont satisfaites.

Chaque activité possède une liste d'*exécuteurs* possibles parmi les différentes catégories de travailleurs définies (par exemple pour la taille un *PermanentPruner* peut tailler mais pas un *PermanentVegetationGrower*). Parmi cette liste, le nombre d'exécuteurs de chaque catégorie nécessaire à la réalisation de l'activité est défini par un mot-clé. Par exemple *anyone* indique que l'activité ne nécessite qu'un travailleur de n'importe quelle catégorie de la liste définie ; *all* signifie que l'activité nécessite tous les travailleurs de toutes les catégories de la liste. Les mêmes opérateurs sont utilisés pour définir le matériel nécessaire à une opération.

Un ensemble organisé par des opérateurs (e.g. *and*, *before*) d'*activités primitives* constitue une activité non primitive (dite aussi agrégée).

3.3.6.2 De l'activité primitive au chantier

A partir de la classe des activités primitives, on a cherché à définir un niveau d'organisation des activités utilisé par les viticulteurs que l'on appelle chantier. On définit le chantier comme une organisation de la réalisation, une seule fois sur chaque parcelle d'un ensemble spécifique, d'un type d'opération correspondant à un but agronomique donné (e.g. le chantier de taille, le chantier de fertilisation). Certains chantiers peuvent être répétés dans le temps, par exemple le chantier de travail du sol de printemps ou le chantier de protection phytosanitaire.

Quelles activités primitives dans un chantier ? Une activité primitive possède des spécifications d'objet opéré, d'opération et d'exécuteur. Si une de ces spécifications change on doit définir une nouvelle instance d'activités primitives.

A l'extrême, un chantier peut être représenté par une seule instance d'activité primitive : l'objet opéré est alors l'ensemble de parcelles concernées, l'opération est unique (donc la spécification de matériel pour l'opération également) et la spécification des exécuteurs est identique pour toutes les parcelles concernées. Cependant, dans les faits, les opérations d'un même chantier peuvent être réalisées avec des moyens différents en fonction des parcelles. Par exemple, une pulvérisation peut être réalisée avec un tracteur et un pulvérisateur tracté dans une parcelle et avec un pulvérisateur à dos (manuellement) dans une autre car le tracteur n'y entre pas (l'écartement entre rang est trop faible). On peut donc avoir des spécifications d'opérations qui sont modifiées en fonction des parcelles et qui peuvent alors modifier les spécifications d'opérateurs. Il faut donc définir au moins autant d'instances d'activités primitives qu'il y a de spécifications d'opérations et d'opérateurs différents en fonction des objets opérés.

Le second point qui définit notre choix de structure pour les chantiers concerne la dynamique temporelle des activités. En effet, si on ne définit qu'une seule instance d'activité primitive incluant un ensemble de parcelles, on ne peut pas modifier dynamiquement l'ordre de réalisation des parcelles. Or, on a défini qu'au pas de temps de la journée, les viticulteurs examinaient le plan d'activité pour réaliser leurs choix tactiques. L'examen doit pouvoir remettre en cause l'ordre des choses à faire en fonction de conditions biophysiques, de l'avancement d'autres travaux, etc.

Par conséquent, on a choisi de créer une instance d'activité primitive par parcelle, ce qui permet :

- d'être flexible sur les spécifications d'opérations et d'opérateurs qui sont changeantes selon les parcelles et les exploitations,
- de remettre en jeu l'ordre de réalisation des parcelles à chaque fois qu'une parcelle est terminée mais aussi l'allocation des ressources puisqu'il y a une mise à jour de la situation chaque fois qu'une activité se termine.

Puisqu'une activité primitive a pour objet opéré une seule parcelle, on définit les opérateurs sur les ressources de la façon suivante :

- Pour les activités motorisées (impliquant un tracteur), l'opérateur sur l'exécuteur et le matériel est *anyone 1*, c'est à dire qu'on alloue un seul ensemble de ressources nécessaires à la réalisation de l'activité, typiquement un tracteur, un outil tracté et un conducteur (tracteuriste). La composition interne de l'ensemble n'est pas contrainte à cause de l'opérateur *anyone* (parmi les classes de ressources indiquées comme aptes pour l'activité, on peut mettre en oeuvre n'importe quelle instance de classe) mais par contre il ne peut y avoir qu'un ensemble de ressources sur une parcelle pour réaliser l'activité. En effet on n'a pas observé dans notre zone d'étude de travaux motorisés réalisés avec deux tracteurs ou plus.
- Pour les activités manuelles de pulvérisation, on définit également un opérateur *anyone 1* car on considère que les viticulteurs, orientant leur trajet dans la parcelle compte tenu du sens du vent, ne se mettent pas à plusieurs pour ne pas s'asperger mutuellement de produit.
- Pour les activités manuelles mécaniques (e.g. taille, relevage), l'organisation du travail observée correspond à une mise en oeuvre simultanée de toutes les ressources disponibles

pour l'activité, par conséquent on pose l'opérateur *max* sur les exécuteurs de ces activités. On n'a pas défini de matériel pour ces opérations (e.g. sécateur) car on considère que ce n'est pas un type de matériel limitant, on ne positionne donc pas d'opérateur sur les ressources en matériel.

Les activités primitives constitutives de chaque chantier et leurs opérations sont décrites ultérieurement.

Les opérateurs entre activités primitives Puisqu'on a défini qu'une activité primitive avait pour objet opéré une parcelle et une seule, un chantier est un ensemble d'activités primitives. On utilise deux opérateurs pour lier les activités primitives entre elles et pour constituer un chantier : *and* et *meet*. Si A1, A2 et A3 sont trois instances d'une activité primitive :

- *And* (A1, A2, A3) est une conjonction, cela signifie que toutes les activités peuvent être réalisées simultanément si les ressources le permettent ;
- *Meet* (A1, A2, A3) est un meeting, cela signifie que les activités seront réalisées une par une quelles que soient les ressources disponibles.

Le choix de ces deux opérateurs est lié aux différentes organisations du travail que l'on a observé chez les viticulteurs. En effet, certains choisissent de lancer une activité sur plusieurs parcelles simultanément alors que d'autres limitent une activité donnée à n'être réalisée que sur une seule parcelle à la fois, soit parce que le viticulteur est seul, soit parce qu'il préfère diversifier les activités.

On définit alors deux types pour un même chantier : en parallèle (*Concurrent*, conjonction) ou en série (*Serial*, meeting). Par exemple, on a défini pour le chantier de travail du sol de printemps, un chantier *ConcurrentSpringTillages* qui peut se réaliser sur plusieurs parcelles simultanément et un chantier *SerialSpringTillages* qui ne peut se réaliser que sur une parcelle à la fois.

Les contraintes temporelles sur les chantiers Chaque chantier, en tant qu'activité, possède des méthodes *OpeningPredicate* et *ClosingPredicate* qui définissent les conditions d'ouverture et de fermeture du chantier. Ce peut être une combinaison de conditions qui peuvent être des dates calendaires, des états biophysiques, des conditions climatiques, des états d'avancement d'autres chantiers, etc.

Des exemples de conditions sont présentés pour un chantier dans une partie suivante (cf 3.3.7.3).

Une constitution dynamique des listes d'activités primitives pour les chantiers

On considère que le viticulteur, compte tenu de son programme général, des informations dont il dispose (environnement, état biophysique de ses parcelles) et de sa gestion tactique, réévalue régulièrement son agenda de travail. On se donne donc la possibilité de revoir cet agenda au pas de temps de la journée. Pour un chantier donné, la liste ordonnée des parcelles à faire (et donc des activités primitives) va donc être revue quotidiennement. Pour représenter cette constitution dynamique de l'agenda on attache des méthodes aux chantiers qui permettent de sélectionner dynamiquement les parcelles à faire au fur et à mesure de l'avancée du chantier. Ces méthodes seront mises en oeuvre à chaque mise à jour de la situation², c'est-à-

². Mise à jour de l'état des activités qui sont définies comme *dormantes*, *en attente*, *ouvertes*, *fermées*, *annulées*.

dire chaque matin. Le principe de la constitution dynamique des listes d'activités est le suivant. A l'ouverture d'un chantier, une première liste d'activités est créée. Ensuite, le lendemain puis chaque jour jusqu'à la fermeture du chantier, la liste est mise à jour : les activités terminées sont retirées, les activités en cours sont maintenues, les activités non réalisées sont remises en question selon le contexte climatique, biophysique, organisationnel, elles seront maintenues dans la liste ou d'autres pourront prendre leur place. La liste est constituée de telle sorte qu'elle permette de prévoir un programme suffisamment conséquent pour le chantier en question jusqu'au lendemain (nouvel examen du programme). Mais en cas d'épuisement inattendu de la liste, les méthodes peuvent être lancées en cours de journée, par des mises à jour surnuméraires de la situation, pour constituer une nouvelle liste de parcelles et donc d'activités primitives.

A chaque mise à jour de la situation (*UpdateSituation*):

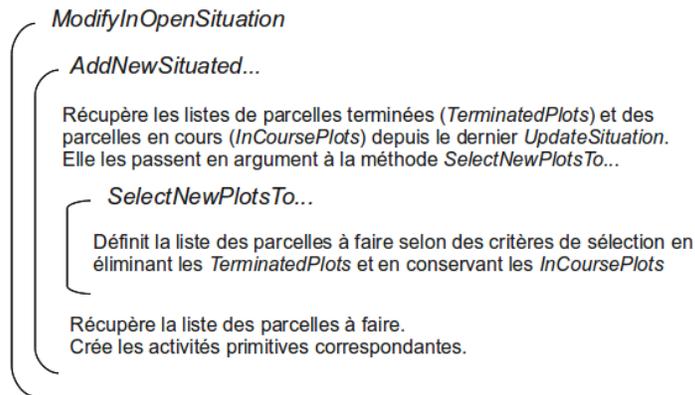


FIGURE 3.8 – Constitution dynamique des listes d'activités par trois méthodes des chantiers

les règles d'arbitrage signalées par les viticulteurs (par exemple : les parcelles les plus enherbées seront les premières à être travaillées). Elle met également en oeuvre les règles d'enchaînements entre travaux à l'échelle parcellaire (par exemple : pour le broyage des sarments, elle ne sélectionne que des parcelles taillées).

3.3.6.3 Du chantier au plan d'activité

Le plan d'activité a pour vocation de définir la trame des actions à réaliser au cours d'un cycle cultural. On présente dans la suite l'architecture des plans mis en oeuvre dans le modèle.

L'utilisation des opérateurs pour la représentation des chantiers Pour passer des chantiers au plan, on utilise des opérateurs. Un premier niveau consiste à attribuer un opérateur à un chantier donné (si nécessaire) pour définir soit qu'il est optionnel c'est à dire qu'il est réalisé si possible, *opt*(Chantier), soit qu'il est itéré c'est à dire qu'il est répété plusieurs fois, *iterate*(Chantier).

Dans le cas des chantiers optionnels on doit définir une contrainte temporelle sous forme de méthode appelée *MaxBegPredicate* qui définit à partir de quand on considère que le chantier non encore ouvert peut être abandonné (*cancelled*) sans que cela constitue un échec de la réalisation du plan. Lors de la présentation générale des systèmes de culture viticoles on a indiqué que certains travaux étaient obligatoires comme la taille et que d'autres étaient dépendants du contexte, comme par exemple la protection phytosanitaire ou la fertilisation. Pour autant, on

Les méthodes sont présentées dans la figure 3.8.

ModifyInOpenSituation est une méthode fournie par l'environnement DIESE dont héritent toutes les activités non primitives. Elle permet de modifier un chantier ouvert, c'est-à-dire modifier la liste des activités primitives grâce à la méthode *AddNewSituat...* définie dans l'application. Celle-ci exécute une méthode *SelectNewPlotsTo...* qui définit la liste des parcelles à traiter. Cette méthode qui sélectionne dynamiquement les parcelles permet de gérer les concurrences entre parcelles en mettant en oeuvre

s'est basé sur les discours des viticulteurs pour définir les chantiers optionnels. Par exemple, la fertilisation n'étant pas effectivement réalisée tous les ans, on considère ce chantier optionnel. Par contre, la protection phytosanitaire n'est jamais apparue comme optionnelle chez les viticulteurs rencontrés. Ce chantier n'est donc pas considéré comme optionnel.

Pour les chantiers itérés, on doit définir une méthode appelée *UpdateReactivatedSon* qui organise les répétitions temporelles du chantier, notamment la contrainte temporelle d'espace-ment minimal de deux chantiers (si on ne définit rien, deux chantiers peuvent alors s'enchaîner sans autre contrainte que leurs propres contraintes temporelles). Par exemple, la cadence des traitements anti-oïdium est définie dans la méthode *UpdateReactivatedSon* du chantier itéré de traitements phytosanitaires (*RegularPhytoTreatmentIteration*) et conditionne ainsi l'espace-ment entre deux applications de traitements anti-oïdium sur l'exploitation.

Un second niveau consiste à utiliser les opérateurs pour organiser les chantiers entre eux. Par exemple *before*(ChantierA, Chantier B) indique que le ChantierA sera réalisé avant le ChantierB. Les enquêtes ont montré qu'en fonction des choix tactiques, les viticulteurs pouvaient définir des règles d'enchaînements des opérations au niveau parcellaire (e.g. on taille avant de broyer les sarments) mais également au niveau des chantiers c'est-à-dire à l'échelle de l'exploitation (e.g. le travail du sol d'automne ne commence que si la fertilisation est terminée). Les opérateurs peuvent donc permettre de définir ces règles d'enchaînement entre chantiers. Cependant, ces règles étant variables d'une exploitation à l'autre, on a fait le choix de ne pas les représenter par les opérateurs dans le plan mais par les contraintes temporelles sur les chantiers. Ainsi on conserve un plan le plus générique possible pour l'ensemble des exploitations. Ce choix est lié à la représentation de plusieurs exploitations et à la nécessité de faciliter l'écriture de la stratégie.

Le plan s'appuie donc sur une conjonction de chantiers *And*(ChantierA, ChantierB, ...) qui s'organisent dynamiquement en fonction de leurs contraintes propres.

La gestion des priorités entre activités concurrentes Les enquêtes ont montré qu'en cas de concurrence entre activités de différents types, les viticulteurs appliquaient des règles d'organisation du travail qui changent selon la période du cycle cultural. Ils arbitrent entre les activités pour réaliser l'allocation des ressources. On aborde dans cette partie la manière de gérer cette concurrence entre activités et l'effet sur le plan d'activités.

Tout d'abord, la concurrence étant dépendante de la période dans laquelle on se trouve, on a défini les différentes périodes du cycle cultural pour lesquelles la concurrence entre activités pouvaient être gérées différemment. Ces périodes sont présentées sur la figure 3.9.

Un premier moyen de gérer l'allocation des ressources pour chaque période est de définir pour chaque chantier s'il est de type *Serial* ou *Concurrent*. En fonction des périodes, on a observé différentes combinaisons possibles en fonction des viticulteurs, qui seront présentées ultérieurement. Sur la figure 3.9 on peut voir qu'un chantier peut être réalisé sur deux périodes différentes. Or, on peut lui attribuer la qualité de *Serial* pour une période et celle de *Concurrent* pour une autre car l'organisation du travail évolue. Par exemple, le travail du sol à l'automne peut être réalisé en parallèle (*Concurrent*) sur plusieurs parcelles après les vendanges mais s'il n'est pas fini quand la taille commence, la plupart des viticulteurs le réalise alors en série (*Serial*) pour pouvoir réaliser simultanément de la taille et ces travaux du sol qui ne sont pas terminés. On a vu précédemment que les types *Serial* et *Concurrent* se différenciaient sur les opérateurs entre activités primitives. Même si les activités sont identiques, ce sont donc bien deux chantiers différents.

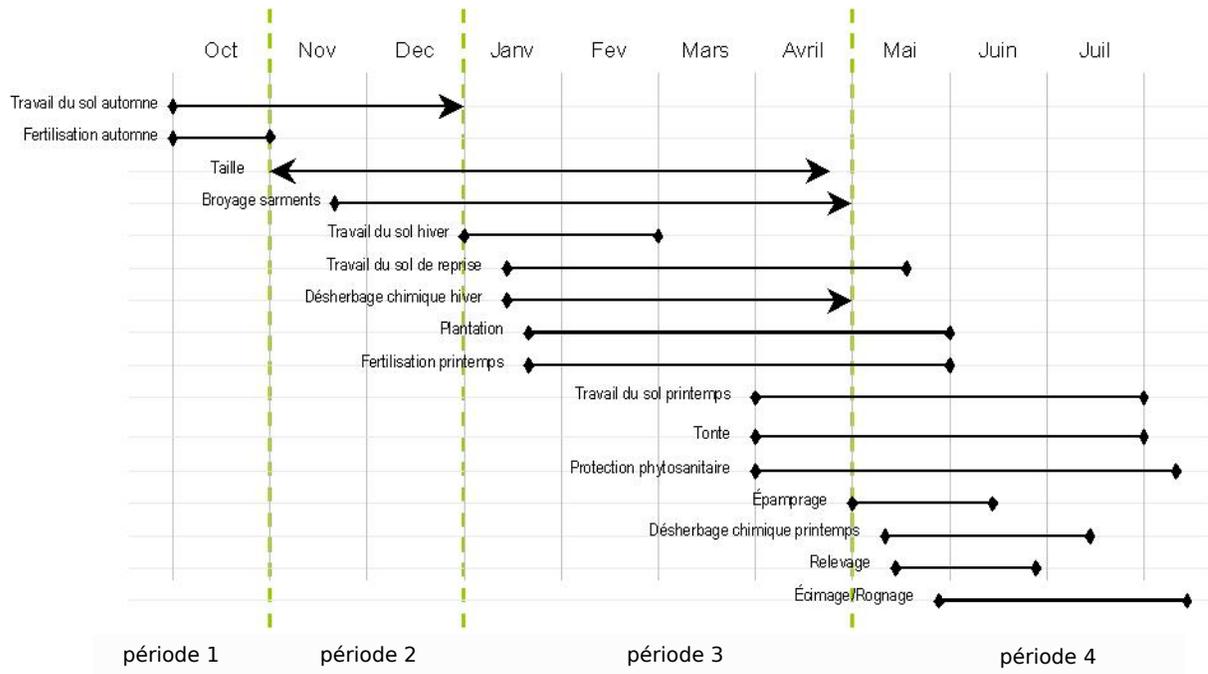


FIGURE 3.9 – Périodes dont dépend l'organisation du travail

Par conséquent, pour permettre le changement de chantier d'une période à une autre, on a défini que le plan d'activité était une séquence de sous-plans (*VineyardControlSequence*), chaque période définissant un sous-plan :

<i>Before</i> (<i>And</i> (SerialChantierA, ConcurrentChantierB,...),	période 1
	<i>And</i> (SerialChantierB, SerialChantierE,...),	période 2
...)

En complément de ces modes de constitution des chantiers, l'allocation des ressources dépend de règles d'arbitrage entre activités. Les règles d'arbitrage définissent, dans un jeu d'activités, quelles activités sont prioritaires en terme d'allocation des ressources et d'exécution. On les met en oeuvre par deux biais :

- l'attribut *AllocationPriorityDegree* des activités primitives qui ordonnent les activités d'un jeu pour que celles qui possèdent les priorités d'allocation les plus fortes soient les premières évaluées pour l'allocation ;
- les règles de préférences qui permettent de sélectionner le jeu d'activités préféré par des méthodes de type *LocalBestActivitySetSelector* qui sont attachées aux exploitations.

Les priorités à appliquer sont les mêmes pour l'allocation et la sélection des jeux d'activités. Chaque exploitation possède un descripteur *AllocationPriorityOptionSetAttribute* qui définit les valeurs de priorité à utiliser. Suite aux enquêtes, un seul jeu de valeurs a été défini, les priorités étant plutôt homogènes entre exploitation, mais il est possible d'attribuer des jeux de valeurs différents par exploitation. Les jeux d'activités seront donc ordonnés en interne sur ces priorités.

Par ailleurs, une méthode *StandardBestActivitySetSelector* est exécutée lors de la procédure d'interprétation du plan. Dans DHIVINE, il s'appuie sur les valeurs des *AllocationPriorityDegree* des activités du jeu pour sélectionner le jeu le plus pertinent (en l'occurrence sur la priorité moyenne des activités du jeu). D'autres méthodes de sélection des jeux ou d'élimination pourront être ajoutées (par exemple pour préférer des jeux avec des activités en cours même si le jeu n'est pas celui avec la priorité moyenne la plus forte) et ces méthodes peuvent être différentes d'une exploitation à une autre.

3.3.7 Du plan aux activités réalisées : l'application de la stratégie de conduite dans DHIVINE et son interprétation

3.3.7.1 Le plan d'activités

La figure 3.10 présente un exemple de plan d'activité d'une exploitation dans DHIVINE. On peut voir que la structure du plan est simple et organisée sur les périodes qui sont des conjonctions de chantiers. D'une exploitation à l'autre, la structure n'est pas modifiée. Les seuls changements dans les plans reposent sur la présence ou non des chantiers et sur le type d'organisation des chantiers (*Serial* ou *Concurrent*).

On peut voir que les chantiers ou les périodes peuvent être précédés d'un opérateur *Opt* qui désigne l'optionnalité ou d'un opérateur *Iterate* qui indique la répétition d'un chantier au cours du temps.

La protection phytosanitaire est organisée de manière particulière (bien que constante entre les exploitations) pour tenir compte (i) des différentes gestions selon que le traitement

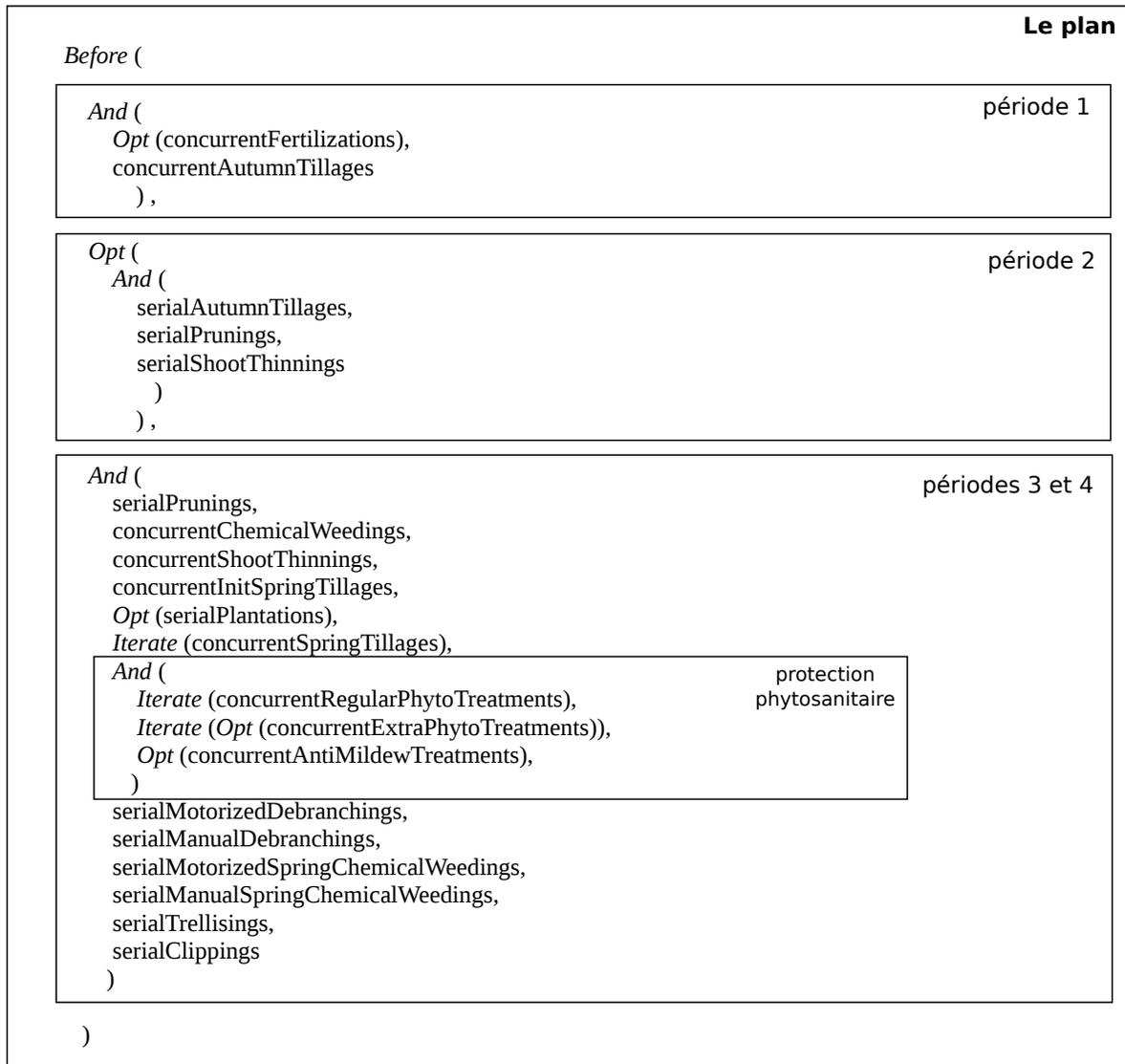


FIGURE 3.10 – Exemple d'un plan d'activité dans DHIVINE

réalisé est préventif ou curatif³ ; (ii) des couplages entre traitements que mettent en oeuvre les viticulteurs. En effet, pour économiser des passages, plusieurs produits destinés à lutter contre des bio-agresseurs différents peuvent être mélangés dans la cuve et appliqués ensemble. Dans DHIVINE, nous représentons les protections réalisées contre l'oïdium et le mildiou qui, chez les viticulteurs enquêtés, sont couplées. La protection contre l'oïdium mise en oeuvre chez les viticulteurs enquêtés est de type préventive et se trouve donc renouvelée régulièrement (tous les 10 à 20 jours en moyenne), elle structure donc l'organisation des autres traitements. On a ainsi défini un chantier itéré *RegularPhytoTreatments* qui représente les traitements réalisés régulièrement et qui peut concerner l'un ou les deux bio-agresseurs. Le positionnement temporel de ces chantiers est principalement défini par les cadences de renouvellement des traitements préventifs contre l'oïdium. En complément on définit un chantier itéré et optionnel *ExtraPhytoTreatments* qui représente les traitements curatifs contre l'oïdium éventuellement réalisés en intercalaire (et donc en supplément) des traitements réguliers. Enfin, on a défini un chantier optionnel *AntiMildewTreatments* qui représente un éventuel traitement anti-mildiou réalisé en dehors du rythme des traitements dits « réguliers ». En effet, les traitements anti-mildiou pouvant, eux, être réalisés en curatif, il se peut que le moment où il devient nécessaire de réaliser le premier traitement curatif contre le mildiou ne s'accorde pas avec le moment prévu pour le prochain traitement préventif contre l'oïdium. Dans ce cas, il y a nécessité à découpler les deux traitements et à réaliser séparément le traitement anti-mildiou, ce que représente le chantier *AntiMildewTreatments*. Pour les traitements suivants, les viticulteurs font en sorte de recaler ensemble les cadences des traitement anti-oïdium et anti-mildiou, les protections contre les deux maladies sont ainsi réalisées ensemble dans le cadre des chantiers dits « réguliers » (*RegularPhytoTreatments*).

L'organisation des chantiers pour la protection phytosanitaire s'appuie donc fortement sur le caractère structurant et répétitif des traitements préventifs contre l'oïdium et sur le fait que, dans la zone d'étude, les viticulteurs cherchent à coupler au maximum les traitements contre l'oïdium et le mildiou. Cependant, cette situation ne peut pas correspondre à une conduite technique de la protection phytosanitaire de type intégrée pour laquelle il n'y aurait pas de traitement de type préventif. Dans ce cas, il serait plus juste de définir un chantier individuel par bio-agresseur, les luttes étant réalisées séparément et en conjonction.

Le plan est bien une séquence de sous-plans. Chaque sous-plan correspondant à une période est une conjonction (*and*) d'activités. On va maintenant voir comment on représente l'organisation du travail dans ces périodes en utilisant les deux types de chantiers définis : en série (*Serial*) et en parallèle (*Concurrent*) et les priorités sur les activités.

3.3.7.2 L'organisation du travail en fonction des périodes

Quatre périodes ont été définies dans DHIVINE pour permettre de caractériser l'organisation du travail entre les différents chantiers. Elles s'appuient sur les résultats des enquêtes. Actuellement, par manque de temps, les périodes 3 et 4 ne sont pas représentées séparément.

L'organisation du travail au cours d'une période donnée est représentée par :

- la définition des chantiers en mode *Serial* ou *Concurrent* et leur association ;
- la valeur de la priorité d'exécution des activités primitives réalisées dans le cadre des chantiers ;

3. On qualifie de curatif tout traitement, organisé au niveau de l'exploitation et mis en oeuvre sur certains lots de parcelles, qui s'appuie sur des observations de symptômes ou de présence de la maladie sur l'ensemble des parcelles à traiter ou sur des parcelles guides.

- les ressources demandées par les activités primitives qui constituent les chantiers et allouées notamment en fonction de la priorité d'allocation.

La période automnale Cette période (numérotée 1 sur la figure 3.9) s'étend de la fin des vendanges au début de la taille qui la clôture. Elle correspond à une période de réalisation du travail du sol automnal (*Autumn Tillages*) qui a pour objectif de décompacter le sol après les vendanges et de limiter la croissance hivernale des adventices pour faciliter la reprise du travail du sol au printemps. Elle peut également inclure la fertilisation (*Fertilizations*). Ces deux chantiers ne sont pas réalisés par toutes les exploitations, par conséquent cette période peut ne pas comporter de chantier.

A cette période l'ordre de priorité est le suivant :

Fertilisation > Travail du sol

Deux types d'organisation ont été observés et sont représentés par des chantiers de type *Serial* ou *Concurrent*.

La première organisation, que l'on retrouve en exemple dans la figure 3.10, consiste à attribuer toutes les ressources possibles sur le chantier le plus prioritaire. Si des ressources ne peuvent être employées par ce chantier, elles sont alors reportées sur les chantiers de moindre priorité. On instancie donc des chantiers de type *Concurrent* qui permettent de réaliser l'opération sur plusieurs parcelles simultanément. Le plan d'activités dans ce cas est donc :

*And (ConcurrentFertilizations ,
ConcurrentAutumnTillages)*

La seconde organisation consiste à réaliser plusieurs opérations différentes simultanément en partageant les ressources entre les différents chantiers. Pour représenter ce mode d'organisation, on définit les chantiers réalisés en série (*Serial*), ainsi ils ne peuvent être mis en oeuvre simultanément sur deux parcelles. Si après attribution des ressources au chantier le plus prioritaire pour opérer une parcelle, il reste des ressources, elles seront ainsi redistribuées sur un autre chantier. Le plan d'activités dans ce cas est donc :

*And (SerialFertilizations ,
SerialAutumnTillages)*

La période automnale optionnelle Cette période (numérotée 2 sur la figure 3.9) s'ouvre avec le début de la taille. Elle se clôture quand le travail du sol automnal se termine. Si ce dernier est déjà terminé quand la taille commence ou qu'il n'est pas réalisé sur l'exploitation, alors la période est immédiatement fermée et on passe à la période suivante. Cette période est donc optionnelle.

Elle a été définie parce que les enquêtes ont montré que si, alors que la taille (*Prunings*) pouvait commencer, le travail du sol automnal n'était pas fini, les viticulteurs pouvaient modifier leur organisation du travail pour s'adapter à la nouvelle situation de concurrence. On définit donc l'ordre de priorité d'allocation suivant :

Travail du sol > Broyage des sarments > Taille
associé au plan d'activité unique :

*And (SerialAutumnTillages,
SerialPrunings,
SerialShootThinnings)*

Ainsi les activités de travail du sol sont réalisées prioritairement (car le chantier doit être terminé pour libérer les ressources pour la taille) mais on limite sa réalisation à une parcelle

à la fois. Les ressources libres peuvent donc être attribuées aux autres chantiers, soit la taille, soit le broyage des sarments (*ShootThinnings*) quand celui-ci a commencé.

Cette période définit donc les modalités spécifiques de gestion des concurrences entre taille et travail du sol automnal.

Les périodes hiver - début de printemps et printemps -été La période hiver - début de printemps (numérotée 3 sur la figure 3.9) correspond à un ensemble d'opérations culturales réalisées généralement de début novembre à fin avril. Son commencement est défini par la fin du travail du sol automnal (dans le cas où il n'y en a pas, elle commence quand la période automnale est terminée soit au début de la taille). Elle se termine quand les chantiers de taille, de broyage des sarments et de désherbage chimique sont terminés, c'est à dire quand les viticulteurs entrent dans la période suivante plutôt caractérisée par la réalisation des traitements phytosanitaires. Cette période printemps - été (numérotée 4 sur la figure 3.9) dure ensuite jusqu'à la fin du cycle cultural.

Ces périodes présentent un grand nombre de chantiers. On retrouve généralement, comme à l'automne, soit des organisations de type *Serial* qui permettent de distribuer les ressources sur différents chantiers, soit des organisations mettant en oeuvre des chantiers de type *Concurrent* pour favoriser l'opération la plus prioritaire (toutes les ressources possibles seront attribuées à ce chantier pour opérer plusieurs parcelles simultanément). Sur l'exemple de conduite décrit dans la figure 3.10, les chantiers plutôt réalisés en période 3 (première partie de la liste avant le cadre « protection phytosanitaire ») sont majoritairement de type *Concurrent* alors que ceux plutôt réalisés en période 4 sont majoritairement de type *Serial*.

Certains chantiers peuvent être réalisés en parallèle (*Concurrent*) quand les autres sont réalisés en série (*Serial*). C'est le cas par exemple des traitements phytosanitaires, auxquels un viticulteur voudrait attribuer le maximum de ressources et faire simultanément le plus de parcelles possibles. Ainsi ce chantier réquisitionne des ressources mais pour un temps très court (le traitement de l'ensemble de l'exploitation est généralement réalisé en quelques jours); le viticulteur ne prend pas le risque de se faire surprendre par des conditions météorologiques défavorables aux traitements et les parcelles de l'exploitation sont gérées de manière homogène (les dates de traitements sont peu différentes).

Un autre exemple concerne le travail du sol. Ce chantier peut être instancié en parallèle (*Concurrent*) en association avec une valeur de priorité faible (on fait l'inverse de la période automnale optionnelle). Ainsi, le travail du sol n'est pas réalisé prioritairement mais si des ressources ne sont pas occupées à d'autres travaux plus prioritaires, elles peuvent permettre de réaliser le travail du sol de plusieurs parcelles simultanément. Cette organisation du travail a été observée chez certains viticulteurs.

Enfin, certains chantiers peuvent être instanciés en *Serial* alors que la majorité sont de type *Concurrent*. C'est plus particulièrement le cas pour les chantiers manuels. En effet, si une opération peut être réalisée dans une parcelle par plusieurs personnes (e.g. le relevage ou la taille) et que le chantier est organisé de telle sorte que l'on fasse les parcelles les unes après les autres, alors le chantier est en série (*Serial*). Dans cette situation, c'est l'opérateur *max* présent sur l'activité primitive qui permettra d'allouer toutes les ressources possibles à ce chantier s'il est considéré comme prioritaire. En effet, si l'activité est la plus prioritaire, elle se verra allouer les ressources en premier selon ses exigences définies par son opérateur sur les exécuteurs. Si cet opérateur est *max*, elle se verra allouer toutes les ressources disponibles. Puis les jeux étant sélectionnés suivant le même ordre de priorité, le jeu qui l'inclut sera sélectionné prioritairement.

L'organisation du travail qui consiste à gérer l'allocation des ressources est donc représentée via les exigences en ressources des activités constitutives des chantiers, l'organisation des chantiers en série ou en parallèle et la priorité des chantiers.

On va maintenant expliciter comment est modélisé un chantier, en prenant l'exemple du chantier de travail du sol automnal.

3.3.7.3 Un exemple de chantier : le travail du sol automnal

Les contraintes temporelles Chaque chantier est caractérisé par des contraintes temporelles qui sont définies par des conditions d'ouverture (*OpeningPredicate*) et des conditions de fermeture (*ClosingPredicate*).

Dans DHIVINE, et bien que ce soit possible, on ne différencie pas ces contraintes selon que le chantier s'organise de façon *Serial* ou *Concurrent* car on n'a pas établi qu'il existait des liens entre l'organisation du chantier et ses contraintes temporelles de réalisation.

Au chapitre précédent on a présenté la formalisation des pratiques de travail du sol automnal et on a indiqué que deux règles, de déclenchement et de fin, avaient été identifiées comme variables entre exploitations. Ces règles ont été identifiées compte tenu de leur effet potentiel sur la répartition spatio-temporelle des opérations de travail du sol. On a donc souhaité qu'elles puissent être paramétrées différemment dans le modèle. On présente ici comment cette variabilité est prise en compte.

Trois modalités possibles d'ouverture des chantiers sont actuellement définies⁴ :

- une ouverture à la fin des vendanges (END_HARV), comme on ne représente pas le chantier des vendanges, cette condition repose sur une date de fin de vendanges qui a été définie au 1er octobre. ;
- une ouverture à la fin de la fertilisation (END_FERT) ;
- une ouverture au 20 octobre (MID_OCT), cette condition représente les cas des viticulteurs qui nous ont dit espacer la fin des vendanges et le travail du sol, soit pour prendre du repos, soit pour effectuer des travaux de caves par exemple.

Lors de la mise à jour de la situation chaque matin, le modèle évalue si des activités *en attente* doivent être *ouvertes*. Dans le cas des conditions d'ouverture sur des dates (END_HARV ; MID_OCT), il va donc être testé l'atteinte de la date du jour par rapport à la date d'ouverture définie. Dans le cas de l'option « fin de la fertilisation », le descripteur *PercentFertilized* de la parcelle est évalué pour chaque parcelle. Ce descripteur définit (i) si une opération donnée, en l'occurrence la fertilisation, est à faire sur une parcelle (si ce n'est pas le cas il possède la valeur -1) ; (ii) dans le cas où l'opération est à réaliser, à quel niveau d'avancement elle se trouve (entre 0 et 1). Si une parcelle a une valeur différente de 1 ou de -1 pour ce descripteur, le chantier de travail du sol automnal ne peut alors être ouvert. La valeur initiale du descripteur *PercentFertilized* dépend du plan d'activité de l'exploitation, si le chantier de fertilisation n'est pas présent, les descripteurs de toutes les parcelles auront une valeur de -1, sinon par défaut il auront une valeur de 0 et au fur et à mesure de l'avancée des opérations leur valeur sera augmentée.

La condition de fermeture du chantier correspond à la fin de la réalisation des opérations sur l'ensemble des parcelles concernées. On teste donc le descripteur *PercentAutumnTilled* des parcelles pour évaluer les possibilités de fermeture du chantier. Cependant le chantier de travail du sol automnal peut être arrêté même si toutes les parcelles n'ont pas été travaillées.

4. Le choix de la modalité pour une exploitation donnée est paramétré dans un fichier externe.

En effet, les viticulteurs qui n'ont pu réaliser à temps ce travail peuvent l'abandonner pour se consacrer à des travaux plus prioritaires et dont le retard porterait plus à conséquence sur la production (e.g. taille). Pour définir cette limite temporelle que se donnent les viticulteurs, on a défini trois modalités de fermeture du chantier qui correspondent aux 3 principales modalités relevées au cours des enquêtes :

- le début de la taille (BEG_PRUN) ;
- la fin novembre (30/11) (NOVEMBER) ;
- la fin décembre (31/12) (DECEMBER).

Les conditions qui portent sur des dates sont évaluées comme indiqué précédemment pour les conditions d'ouverture. La condition sur le début de taille est évaluée sur le statut du chantier de taille qui doit être ouvert.

Ce chantier de travail du sol automnal peut être réalisé à cheval sur la période automnale et la période automnale optionnelle. Les périodes constituent des sous-plans (figure 3.10). Donc si le chantier n'est pas terminé au moment de la fermeture de la période automnale (le début de la taille) et s'il doit se poursuivre sur la période automnale optionnelle, il est fermé en même temps que la période automnale (indépendamment des conditions de fermeture indiquées précédemment). Puis il est ouvert de nouveau en période automnale optionnelle. Il se poursuit ensuite jusqu'à sa fermeture en réponse aux conditions de fermeture définies ci-avant. Dans ce cas, ce chantier est scindé en deux sous-chantiers appartenant à deux périodes différentes. On voit donc que la structure du plan en périodes provoque des contraintes sur la définition des conditions d'ouverture et de fermeture des chantiers pour permettre que ces chantiers aient lieu sur des périodes successives.

La sélection dynamique des parcelles Une fois ouvert, et tant qu'il n'est pas fermé, le chantier sélectionne chaque matin des parcelles à faire parmi celles dont le *PercentAutumnTilled* est différent de 1 (la parcelle est travaillée) ou de -1 (la parcelle n'est pas à travailler). Actuellement cette sélection est rudimentaire puisqu'elle n'est conditionnée que par un nombre de parcelles, typiquement on sélectionne à l'aveugle 2 ou 3 parcelles qui seront mises dans la liste des travaux à réaliser pour la journée. Cette sélection pourra être améliorée pour se baser sur des critères géographiques ou d'autres caractéristiques des parcelles. Par exemple, pour le cas du chantier de travail du sol automnal, on a identifié des règles d'arbitrage entre parcelles qui portaient sur la compaction du sol ou les types de sol des parcelles. Ces éléments sont difficiles à évaluer mais si on souhaite les représenter, on doit le faire au niveau de la méthode de sélection des parcelles pour le chantier.

La création des activités primitives Pour chaque parcelle sélectionnée est créée une activité primitive. Cette activité est incluse dans un jeu d'activité organisé selon un opérateur dépendant du chantier (*and* pour un chantier Concurrent, *meet* pour un chantier Serial). Ce jeu d'activité pour le chantier de travail du sol automnal constitue une partie du jeu d'activités complet incluant l'ensemble des activités de tous les chantiers *en cours*.

Chaque activité primitive, lors de sa création, est dotée d'un degré de priorité d'allocation. Par exemple pour le travail du sol automnal, les activités sont dotées de la valeur 99 soit une valeur de priorité faible (valeurs comprises entre 1 et 100 selon une priorité décroissante).

Les activités primitives correspondant au chantier de travail du sol automnal sont des activités de classe *TillageActivity* et de sous-classe *AutumnTillageActivity* (tableau 3.3). Toutes les activités de la classe *TillageActivity*, qui regroupent l'ensemble des activités de travail

TABLE 3.3 – Les chantiers et leurs activités primitives dans DHIVINE

Opérateur	Chantier	Activité primitive		Brève description de l'activité primitive
		mère	file	
-	AutumnTillages		AutumnTillageActivity	Activité motorisée de travail du sol automnal
Optional	WinterTillages		WinterTillageActivity	Activité motorisée de travail du sol hivernal
-	InitSpringTillages	TillageActivity	InitSpringTillageActivity	Activité motorisée de travail du sol de reprise en fin d'hiver
Iteration	SpringTillages		SpringTillageActivity	Activité motorisée de travail du sol printanière
Optional	Fertilizations	FertilizationActivity	-	Activité motorisée de fertilisation
-	Prunings	PruningActivity	FormationPruningActivity ; GobeletPruningActivity ; GuyotPruningActivity ; RoyatPruningActivity	Activité manuelle de taille pour différents systèmes de taille : gobelet, Guyot, cordon de Royat ; plantiers
-	ShootThinnings	ShootThinningActivity	-	Activité motorisée de broyage des sarments
-	ChemicalWeedings	ChemicalWeedingActivity	ManualChemicalWeedingActivity ; MotorizedChemicalWeedingActivity	Activité de désherbage chimique manuel (pulvérisation avec une machine à dos) ou motorisé (pulvérisateur tracté par le tracteur)
-	SpringChemicalWeedings			
Optional	Plantations	PlantationActivity	-	Activité manuelle de plantation
-	Debranchings	DebranchingActivity	ManualChemicalDebranchingActivity ; ManualMechanicalDebranchingActivity ; MotorizedChemicalDebranchingActivity	Activités manuelles d'épamprage chimique (pulvérisation avec une machine à dos) et mécanique (destruction manuelle des bourgeons) et activité motorisée d'épamprage chimique (pulvérisateur tracté)
-	Trellisings	TrellisingActivity	-	Activité manuelle de palissage
Iteration	Clippings	ClippingActivity	-	Activité motorisée d'écimage/rognage
Iteration	RegularPhytoTreatments	PhytoTreatmentActivity		
Optional (Iteration)	ExtraPhytoTreatments	PhytoTreatmentActivity	ManualPhytoTreatmentActivity ; MotorizedPhytoTreatmentActivity	Activité de traitement phytosanitaire manuel (pulvérisation avec une machine à dos) ou motorisé (pulvérisateur tracté par le tracteur)
Optional	AntiMildewTreatments			

du sol sur le cycle, ont une même spécification pour les exécuteurs des activités, c'est-à-dire pour les ressources en main d'oeuvre qui peuvent réaliser l'activité. En l'occurrence la spécification, *TillageTractorDriverEntitySpec*, donne la possibilité à l'activité d'être réalisée par les travailleurs à compétence multiple (*PermanentAllTasktractorDriver* et *PermanentPreferentialTractorDriver*) ainsi que par les travailleurs appartenant à deux autres classes : les *PermanentTillageOrientedTractorDriver* qui correspondent à ceux qui font des travaux manuels sur l'exploitation et qui peuvent réaliser le travail du sol et les *PermanentTillageTractorDriver* qui ne font que du travail du sol. Ces deux types de main d'oeuvre correspondent souvent à des aides familiales pour les viticulteurs (e.g. un père ou un fils). L'opérateur sur l'exécuteur est *anyone 1*, ce qui signifie que l'activité nécessite un travailleur et n'importe lequel parmi ceux des classes définies juste avant.

Une activité primitive définit également une opération. Pour le travail du sol, deux opérations sont possibles : une opération réalisée avec un outil à dent (*SpringTineOperatedTillage*) et une opération avec un outil rotatif (*RotaryOperatedTillage*) (tableau 3.4). De manière générale, des opérations différentes ont été définies en fonction des outils qu'elles mettaient en oeuvre pour distinguer (i) un effet (par exemple, des pertes au sol différentes en fonction des pulvérisateurs) car cela influence les caractéristiques des actions culturales modélisées ; (ii) les situations de mise en oeuvre des outils (par exemple, l'outil rotatif est plus adapté pour les enherbements développés) car cela conditionne la répartition spatio-temporelle des actions culturales via les contraintes sur les ressources.

Les viticulteurs ont indiqué que le travail du sol à l'automne était plutôt réalisé avec un outil à dent, on instancie donc une opération de type *SpringTineOperatedTillage*. Cette opération spécifie que le matériel utilisé est n'importe quel tracteur (*anyone1 Tractor*) associé à n'importe quel outil à dent (*anyone1 SpringTineCultivator*).

Pour rendre flexible l'attribution des opérations et donc des outils en fonction des ressources disponibles, des parcelles, de la saison, une méthode *ReturnTillageOperationSubClass* a été définie. Elle a pour vocation, en fonction de différents critères, d'attribuer un des deux types d'opérations lors de la création d'activités primitives de classe *Tillage Activity*. Si l'activité est créée sur une parcelle où le couvert herbacé est important, on peut par exemple définir une activité de travail du sol avec un outil rotatif plus adapté à ces situations (il détruit mieux les enherbements développés). Dans le cas du travail du sol automnal, cette méthode définit une activité avec un outil à dent en inspectant le type d'activité primitive (*AutumnTillageActivity*) qui indique la saison et donc l'outil à utiliser.

La réalisation des activités Le processus de création de la liste des activités primitives à réaliser, déclenché par l'évènement *MakeInstructionList*, vérifie que les opérations sont réalisables en testant leurs conditions de faisabilité (*FeasabilityCondition*). En l'occurrence, pour le travail du sol, on évalue les conditions de travaillabilité du sol via sa teneur en eau (on présente la définition de cet indicateur au chapitre 8). Pour la parcelle concernée par l'activité primitive, on inspecte donc, pour les inter-rangs qui sont entretenus par travail du sol (*Soil-ManagementModality*=TILLAGE ou MIXED_TILLAGE_CW), si on est en deça du seuil d'humidité toléré.

Ensuite, le processus cherche à allouer des ressources aux différentes activités primitives en lice en commençant par celles qui ont les plus fortes priorités d'allocation. Les activités primitives de travail du sol automnal seront donc les dernières à être pourvues en ressources. Ensuite le jeu d'activités qui permet d'occuper le plus de ressources et qui a la priorité moyenne

TABLE 3.4 – Les activités primitives et les opérations correspondantes dans DHIVINE

Activité primitive	Opération		Brève description des opérations
	mère	filles	
Manual Operation	PruningActivity	PruningOperation	Opération de taille
	ManualChemicalWeedingActivity		
	ManualChemicalDebranchingActivity	BackSprayingOperation	Opération de pulvérisation de pesticides avec un pulvérisateur à dos
	ManualPhyto TreatmentActivity		
	ManualMechanicalDebranchingActivity	ManualDebranchingOperation	Opération d'épamprage manuel par action mécanique
	PlantationActivity	PlantationOperation	Opération de plantation
	TrellisingActivity	TrellisingOperation	Opération de palissage
	TillageActivity	TillageOperation	Opérations de travail du sol avec un outil rotatif ou un outil à dent
	FertilizationActivity	FertilizationOperation	Opération de fertilisation
	ShootThinningActivity	ShootThinningOperation	Opérations de broyage des sarments avec un outil rotatif de travail du sol ou avec un broyeur
Motorized Operation	ClippingActivity	ClippingOperation	Opération d'écimage/rognage
	MotorizedPhytoTreatmentActivity	VerticalRailOperatedSpraying ; HandHeldGun OperatedSpraying ; AirAssistedSpraying	Opérations de pulvérisation de pesticides avec une rampe verticale ; des pistolets à main ou un pulvérisateur tracté
	MotorizedChemicalWeedingActivity	HorizontalRailOperatedSpraying ; HandHeldGun OperatedSpraying	Opérations de pulvérisation de pesticides avec une rampe horizontale ou des pistolets à mains
	MotorizedChemicalDebranchingActivity	ChemicalDebrancherOperatedSpraying ; HandHeldGunOperatedSpraying	Opérations de pulvérisation de pesticides avec une épampruse chimique tractée ou des pistolets à main

la plus élevée est sélectionné. Par exemple, si deux tractoristes sont disponibles et qu'ils peuvent faire tous deux de la fertilisation car le chantier est de type *Concurrent* (en parallèle) et que les ressources en matériel sont suffisantes, alors un jeu avec deux activités de fertilisation sera retenu. Par contre si la fertilisation est un chantier de type *Serial* (en série) ou s'il n'y a qu'un épandeur d'engrais, alors il sera retenu un jeu comprenant une activité primitive de fertilisation et une autre de travail du sol automnal.

L'évènement *ActInstructionList* lance ensuite le processus de réalisation des activités et donc des opérations correspondantes. Chaque opération possède une vitesse. Pour les opérations motorisées comme le travail du sol, la vitesse est calculée à partir d'une vitesse d'avancement du tracteur. Les vitesses utilisées sont issues de l'IFV (outil Viticout®). En l'occurrence, on paramètre une vitesse de 4km/h. La vitesse de l'opération est ensuite dépendante de la surface intra-parcellaire à travailler. En effet, si seulement un inter-rang sur deux doit recevoir le travail du sol, alors la vitesse en ha/h va différer. On s'appuie donc sur les modalités d'entretien des rangées (*SoilManagementModality*) pour calculer la vitesse (annexe B).

Toutes les heures, au fur et à mesure de l'avancement de l'opération, est réalisée une mise à jour de la durée de travail journalier et hebdomadaire restant disponible pour le ou les travailleurs qui ont réalisé l'opération. Si un travailleur atteint par exemple son quota d'heure journalière ou l'heure de sa pause déjeuner, l'opération est interrompue. Elle peut reprendre immédiatement si une autre ressource est disponible ou elle reste suspendue en attendant une nouvelle disponibilité de travailleurs.

L'effet de l'opération est porté par le descripteur *PercentAutumnTilled* de la parcelle en cours de réalisation. Chaque heure, le descripteur indique le pourcentage réalisé de la parcelle en ce qui concerne le travail du sol automnal. La parcelle est terminée quand le descripteur a pour valeur 1. C'est à ce moment qu'on considère l'action comme effectuée et c'est ce moment qui désignera la date de réalisation de l'action pour le modèle hydrologique.

On a illustré avec le travail du sol automnal comment était modélisée la conduite technique des chantiers dans DHIVINE. La structure et le fonctionnement sont identiques pour tous les chantiers. Le tableau 3.3 présente l'organisation des activités pour l'ensemble des chantiers modélisés dans DHIVINE. On peut voir que certains chantiers sont des éléments d'une activité optionnelle ou itérative (colonne « Opérateur » du tableau 3.3), ce qui n'est pas le cas du chantier de travail du sol automnal. Comme indiqué lors de la présentation de la stratégie de conduite (partie 3.3.6.3) il faut alors définir des contraintes temporelles supplémentaires pour ces activités qui se reportent alors sur les chantiers. Ces contraintes peuvent être différentes d'une exploitation à l'autre et peuvent donc dépendre d'options comme les règles d'ouverture/fermeture pour le travail du sol automnal. C'est le cas de la cadence qui règle l'espacement entre deux traitements réalisés dans le cadre du chantier *RegularPhytoTreatments*. Différentes cadences ont été observées, chaque exploitation se voit donc définir une cadence utilisée par l'activité itérée *RegularPhytoTreatmentsIteration* pour rythmer le renouvellement des chantiers *RegularPhytoTreatments*. Plus généralement, les tableaux du chapitre précédent (2.1 et 2.2) indiquent les règles et variables pour l'action pour lesquelles il est possible de paramétrer différentes modalités pour une exploitation donnée.

On constate également que certains chantiers sont associés à plusieurs activités primitives. Définir différentes activités permet de leur attribuer différentes valeurs de priorité. Par exemple, pour le chantier de taille (*Prunings*), les viticulteurs nous ont signalé préférer commencer par les vignes en gobelet puis tailler plutôt les vignes en guyot avant celles conduites en cordon de Royat. Quant aux plantiers, ils les taillent généralement plus tard. Mais une majorité a également affirmé changer régulièrement de système de taille pour lutter contre la monotonie

à une période où le travail est peu varié. Par conséquent, plutôt que de chercher à représenter ce mode d'ordonnement par la sélection des parcelles, on a gardé une sélection aléatoire mais on a mis des priorités sur les activités primitives. Ainsi, les activités de taille de vigne en gobelet seront prioritairement allouées en ressources (comparées aux autres activités de taille) et les jeux d'activités dans lesquels elles se trouvent auront une priorité moyenne plus élevée, ils seront donc plus susceptibles d'être mis en oeuvre. Pour autant, la sélection aléatoire permet d'introduire des activités de taille de parcelles moins prioritaires.

Une autre raison peut conduire à définir différentes activités primitives : c'est le fait que l'activité nécessite des exécuteurs différents. Par exemple, pour le chantier de désherbage chimique (*ChemicalWeedings*), on a défini deux sous-chantiers : un manuel et un motorisé avec les activités primitives correspondantes. En effet, le désherbage chimique manuel peut être effectué par la majorité des travailleurs alors que le désherbage chimique motorisé doit forcément impliquer un tractoriste. Dans ce cas, lors des phases de sélection des parcelles et de création des activités primitives, un tri est effectué pour attribuer la bonne activité primitive (manuelle ou motorisée). Actuellement ce tri est effectué sur l'écartement entre rangs de la parcelle : les parcelles avec un écartement inférieur à 2m sont désherbées manuellement et les autres le sont avec un pulvérisateur et un tracteur. Il est prévu d'y ajouter une prise en compte des ressources : si le viticulteur n'a pas de matériel pour faire du désherbage motorisé, alors il effectue forcément des activités de désherbage manuel dans toutes ses parcelles. Le principe est le même pour les chantiers de traitement phytosanitaire et d'épamprage (*Debranchings*).

3.3.8 Quelques éléments d'implémentation et de paramétrisation de DHIVINE

La représentation assez précise de la conduite technique des exploitations nécessite de fournir beaucoup d'informations au modèle pour chaque exploitation : les caractéristiques des parcelles, la composition en ressources, etc. Pour faciliter l'utilisation de l'outil dans le cadre de la modélisation de plusieurs exploitations on a fait le choix d'externaliser la définition de toutes les informations qui peuvent être particulières à une exploitation. Ainsi différents fichiers permettent de paramétrer le modèle (annexe C) :

- un fichier (*VineyardPlotSet.txt*) qui décrit les territoires d'exploitation ;
- un fichier (*MaterielMO.txt*) qui décrit les ressources en matériel et main d'œuvre de chaque exploitation, accompagné d'un fichier « *offWorkCalendars.inc* » qui définit les jours de congés ;
- un fichier (*ControlPlan.txt*) qui définit cinq composantes de la stratégie :
 - une *Conduite* qui correspond au plan d'activité nominal et qui définit l'ensemble des chantiers réalisés au cours du cycle cultural ;
 - un *rowManagement* qui définit la répartition des modalités d'entretien du sol entre les parcelles de l'exploitation ;
 - un *plotPattern_optionSet* déclaré dans un fichier « *plotPatternOptionSets.inc* » qui définit les motifs des parcelles : partage spatial rang / inter-rang en fonction des modalités d'entretien du sol ;
 - un *dec_optionSet* déclaré dans un fichier « *decisionOptionSets.inc* » qui définit l'ensemble des options de mise en oeuvre tactiques de la stratégie et qui peuvent être variables d'une exploitation à l'autre, cela correspond aux variables et règles identifiées comme hétérogènes entre exploitations lors des enquêtes ;
 - un *wo_optionSet* déclaré dans un fichier « *workOrganisationOptionSets.inc* » qui définit comment sont organisées les activités d'un chantier (en série, *Serial*, ou en parallèle, *Concurrent*) ;

- un *ap_optionSet* déclaré dans un fichier « phasicAllocationPriorities.inc » qui définit les valeurs des priorités des activités primitives pour chaque période.

De plus, le fichier *DHIVINE.par* permet de définir les paramètres dont les valeurs sont communes à l'ensemble des exploitations comme les vitesses nominales des opérations (en km/h pour les opérations motorisées en nombre de souches par heure pour les opérations manuelles), les horaires de travail des différents calendriers, les cumuls d'heures maximum à la journée et à la semaine, des valeurs d'indicateurs pour la décision (par exemple le seuil de couverture herbacée qui peut être utilisé pour le déclenchement du travail du sol au printemps) qui sont, au moins pour la version en cours du modèle, considérés comme commun à toutes les exploitations.

3.4 Discussion et conclusion

En cherchant à représenter la répartition spatio-temporelle des actions de travail du sol et d'application de pesticides à l'échelle d'un bassin versant, on a été amené à intégrer dans un modèle pour l'action les éléments de la conduite technique des exploitations qui conditionnent les itinéraires techniques réalisés sur les parcelles.

La problématique de la pollution de l'eau par les pesticides nous a amené à modéliser assez précisément, dans l'espace et dans le temps, les actions culturales des viticulteurs. En effet, pour représenter les flux d'eau et de polluants il est important de connaître la mosaïque des valeurs d'infiltrabilité sur le bassin versant et les lieux d'application des pesticides. Or, les parcelles culturales créent un découpage spatial important et rendent spatialement hétérogènes les états d'infiltrabilité et de concentration en pesticides. Cette hétérogénéité est d'autant plus forte dans le cas des cultures pérennes en rangées, comme la vigne, que les modalités d'entretien du sol introduisent des hétérogénéités intra-parcellaires. Le modèle DHIVINE propose donc une représentation fine de l'espace, de l'exploitation à la rangée.

Par ailleurs, lors des événements pluvieux ponctuels dans le temps, les processus hydrologiques se déroulent à une résolution temporelle fine (de l'ordre de la minute), il est donc nécessaire de connaître la répartition spatiale de l'infiltrabilité et de la concentration en pesticides au moment où surviennent ces événements. On a donc cherché à représenter la dynamique des actions culturales en modélisant les différents éléments qui conditionnent le déroulé des actions au sein d'une exploitation : les ressources, l'organisation du travail, les choix de conduite technique des différents travaux réalisés au cours du cycle, l'environnement incontrôlable (climat, maladie). On s'est attaché à respecter les échelles de temps pour la mise en oeuvre des actions : le cycle cultural (échelle annuelle) pour la définition d'un plan d'action, la période (échelle mensuelle) pour la gestion des concurrences entre travaux, la journée pour la mise en oeuvre tactique du plan d'action nominal.

En s'appuyant sur l'ontologie de l'environnement DIESE, le modèle DHIVINE propose donc une structure pour la modélisation des conduites techniques de vignobles languedociens mais avec des choix de représentation des processus de gestion technique applicables à d'autres productions agricoles. En effet, représenter les processus de gestion technique sous la forme d'un plan d'action qui est une séquence de périodes organisant la concurrence entre différents travaux qui ont chacun leurs propres règles de déroulement, constitue une approche assez générale (par exemple mise en oeuvre dans le modèle OTELO) et donc généralisable. La particularité de DHIVINE réside donc dans les travaux modélisés qui sont ceux pour la viticulture. A partir des enquêtes, on a représenté les travaux qui influaient directement ou indirectement

sur la répartition spatio-temporelle de l'infiltrabilité et de la concentration en pesticides. On a intégré la diversité de réalisation observée via des paramètres du modèle modifiables pour chaque exploitation modélisée. Cependant, les travaux représentés sont liés aux exploitations enquêtées. Par exemple, il n'y a pas dans DHIVINE de chantier de travail du sol des rangs avec un outil inter-cep ou de représentation des chantiers de protection phytosanitaire adaptée à une protection de type intégrée. Toutes les conduites techniques et notamment les plus innovantes ne sont donc pas actuellement modélisables avec DHIVINE mais le modèle offre une structure qui permet l'ajout de nouveaux chantiers et leur intégration dans des plans d'actions. Il est donc possible de l'enrichir sans modifier la structure. Il sera d'ailleurs nécessaire de compléter les développements existants, par exemple pour mieux exploiter les méthodes de sélection des parcelles ou pour intégrer un décompte du temps de trajet qui s'ajouterait au temps de réalisation des travaux dans les parcelles.

Tel qu'il a été construit, le modèle permet donc de tester différents aspects de la conduite technique : il est possible d'évaluer l'effet de différentes stratégies d'entretien du sol ; pour une stratégie d'entretien du sol donnée, il est possible de tester différentes modalités pour l'ensemble des variables et règles paramétrables et notamment celles qui définissent la protection phytosanitaire réalisée à l'échelle de l'exploitation ; pour une même stratégie d'entretien du sol, il est également possible de tester l'effet de différents motifs spatiaux des parcelles (par exemple un enherbement 1 inter-rang sur 2 et un enherbement 1 inter-rang sur 4) ; pour des ressources identiques, il est possible de tester différentes organisation du travail. Par ailleurs, l'effet de différents jeux de facteurs incontrôlables sur le déroulé des actions est représenté par l'intermédiaire des conditions de l'environnement auxquels font face les viticulteurs et qui peut les amener, par exemple, à reporter des travaux pour des questions de faisabilité ou à augmenter le nombre de traitements phytosanitaires si les pressions des maladies sont élevées.

En conclusion, le modèle DHIVINE offre donc des possibilités larges d'expérimentation virtuelle sur différents aspects des conduites techniques d'exploitations viticoles et avec une structure adaptée à l'expérimentation à l'échelle du territoire.

Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement Jean-Pierre Rellier, indispensable binôme dans la construction de DHIVINE. Merci à Roger Martin-Clouaire pour son appui. Merci à Aude Ripoche pour m'avoir initiée patiemment à DIESE et à VERDI. Merci à Anne Biarnès et Jean-Marc Barbier, initiateurs de ce travail de modélisation.

Bibliographie

- Attonaty, J., Chatelin, M., Poussin, J., and Soler, L. (1993). Advice and decision support systems in agriculture : new issues. In *Farm level information systems*, pages 89–101, Woudschoten, Zeist, The Netherlands.
- Chatelin, M., Aubry, C., Poussin, J., Meynard, J., Masse, J., Verjux, N., Gate, P., and Bris, X. L. (2005). DeciBle, a software package for wheat crop management simulation. *Agricultural Systems*, 83(1) :77–99.
- Garcia, F., Guerrin, F., Martin-Clouaire, R., and Rellier, J. (2005). The human side of agricultural production management - the missing focus in simulation approaches. In *MODSIM 2005 International Congress on Modeling and Simulation*, pages 203–209. Andre Zenger and Robert M. Argent (eds), modeling and simulation society of australia and new zealand edition.
- Giacomo, G. D., Lesperance, Y., and Levesque, H. (2000). ConGolog, a concurrent programming language based on the situation calculus. *Artificial Intelligence*, 121(1-2) :109–169.
- Guerrin, F. (2009). Dynamic simulation of action at operations level. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 18(1) :156–185.
- Martin-Clouaire, R. and Rellier, J. (2002). Fondements ontologiques des systèmes pilotés. Technical report, UBIA- INRA, Toulouse.
- Martin-Clouaire, R. and Rellier, J. (2003). Modélisation et simulation de la conduite d’un système de production agricole. In *Actes de la 4ème Conférence Francophone de MODélisation et SIMulation : Organisation et Conduite d’Activités dans l’Industrie et les Services - MOSIM’03*, pages 699–704, Toulouse, France.
- Martin-Clouaire, R. and Rellier, J. (2006). Représentation et interprétation de plans de production flexibles. In *Actes des Journées Francophones sur la Planification, la Décision et l’Apprentissage pour la Conduite de Systèmes (JFPDA’06)*, Toulouse, France.
- Martin-Clouaire, R. and Rellier, J. (2009). Modelling and simulating work practices in agriculture. *International Journal of Metadata, Semantics and Ontologies*, 4(1/2) :42–53.
- McCown, R., Hochman, Z., and Carberry, P. (2002). Probing the enigma of the decision support system for farmers : Learning from experience and from theory. *Agricultural Systems*, 74(1) :1–10.
- Morley, D. and Myers, K. (2004). The SPARK agent framework. In *Proceedings of AAMAS-04*, pages 712–719, New York.

- Relier, J., Martin-Clouaire, R., Cialdella, N., Jeuffroy, M., and Meynard, J. (2011). Modélisation de l'organisation du travail en systèmes de grande culture : méthode et application à l'évaluation ex ante d'innovations variétales de pois. In *Le travail en agriculture : son organisation et ses valeurs face à l'innovation*. Pascal Béguin, Benoît Dedieu et Éric Sabourin (eds.), L'Harmattan edition.
- Ripoche, A. (2009). *Modélisation de systèmes de culture adaptatifs : conception de stratégies flexibles d'enherbement en parcelles viticoles*. PhD thesis, Montpellier Supagro.
- Ripoche, A., Relier, J., Martin-Clouaire, R., Biarnès, A., Paré, N., and Gary, C. (2009). Modelling dynamically the management of intercropped vineyards to control the grapevine water status. In *Proceedings of the "Farming Systems Design" symposium on Methodologies for Integrated Analysis of Farm Production Systems*, Monterey, CA.
- Smith, S., Hildum, D., and Crimm, D. (2005). Comirem : An intelligent form for resource management. *IEEE Intelligent Systems*, 20(2) :16–24.
- Woolbridge, M. (2002). *An introduction to multiagent systems*. New York, wiley edition.