



HAL
open science

Pollution de l'eau par les pesticides en milieu viticole languedocien. Construction d'un modèle couplé pression-impact pour l'expérimentation virtuelle de pratiques culturales à l'échelle de petits bassins versants

Nakié Paré

► **To cite this version:**

Nakié Paré. Pollution de l'eau par les pesticides en milieu viticole languedocien. Construction d'un modèle couplé pression-impact pour l'expérimentation virtuelle de pratiques culturales à l'échelle de petits bassins versants. Milieux et Changements globaux. Institut National d'Etudes Supérieures Agronomiques de Montpellier, 2011. Français. NNT : . tel-02810991

HAL Id: tel-02810991

<https://hal.inrae.fr/tel-02810991v1>

Submitted on 6 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**CENTRE INTERNATIONAL D'ETUDES SUPERIEURES
EN SCIENCES AGRONOMIQUES
(Montpellier SupAgro)**

ECOLE DOCTORALE
Systèmes Intégrés en Biologie, Agronomie, Géosciences, Hydrosiences et Environnement
(SIBAGHE)

DOCTORAT
Discipline : Eaux Continentales et Société

Nakié PARE

**POLLUTION DE L'EAU PAR LES PESTICIDES
EN MILIEU VITICOLE LANGUEDOCIEN**

**Construction d'un modèle couplé pression-impact
pour l'expérimentation virtuelle de pratiques culturales
à l'échelle de petits bassins versants**

Directeur de thèse: **Dr Marc Voltz**
Co-directeurs: **Anne Biarnès et Jean-Marc Barbier**

Soutenue le 15 juin 2011

Membres du Jury :

Anne-Véronique Auzet Professeur (Université de Strasbourg, Strasbourg)
Frédéric Garcia Directeur de recherche (INRA, Toulouse)
Marc Benoît Directeur de recherche (INRA, Nancy)
Christian Gary Directeur de recherche (INRA, Montpellier)
Philippe Martin Maître de conférence (AgroParisTech, Paris)
Marc Voltz Directeur de recherche (INRA, Montpellier)

Présidente
Rapporteur
Rapporteur
Examinateur
Examinateur
Directeur de thèse

**CENTRE INTERNATIONAL D'ETUDES SUPERIEURES
EN SCIENCES AGRONOMIQUES
(Montpellier SupAgro)**

ECOLE DOCTORALE
Systèmes Intégrés en Biologie, Agronomie, Géosciences, Hydrosiences et Environnement
(SIBAGHE)

DOCTORAT
Discipline : Eaux Continentales et Société

Nakié PARE

**POLLUTION DE L'EAU PAR LES PESTICIDES
EN MILIEU VITICOLE LANGUEDOCIEN**

**Construction d'un modèle couplé pression-impact
pour l'expérimentation virtuelle de pratiques culturales
à l'échelle de petits bassins versants**

Directeur de thèse: **Dr Marc Voltz**
Co-directeurs: **Anne Biarnès et Jean-Marc Barbier**

Soutenue le 15 juin 2011

Membres du Jury :

Anne-Véronique Auzet Professeur (Université de Strasbourg, Strasbourg)
Frédéric Garcia Directeur de recherche (INRA, Toulouse)
Marc Benoît Directeur de recherche (INRA, Nancy)
Christian Gary Directeur de recherche (INRA, Montpellier)
Philippe Martin Maître de conférence (AgroParisTech, Paris)
Marc Voltz Directeur de recherche (INRA, Montpellier)

Présidente
Rapporteur
Rapporteur
Examinateur
Examinateur
Directeur de thèse

Résumé

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

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

Abstract

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

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

Table des matières

Introduction : positionnement scientifique	13
1 Cas d'application et démarche	27
1.1 Cas d'application : la plaine viticole languedocienne	29
1.1.1 La problématique environnementale : la pollution de l'eau par les pesticides	29
1.1.2 Les systèmes de culture viticoles	30
1.1.3 Le contexte paysager	32
1.1.4 Fonctionnement hydrologique général des bassins versants de la zone d'étude	36
1.1.5 Bilan sur les déterminants de la pollution de l'eau par les pesticides . . .	37
1.2 Modélisation couplée pression-impact	37
1.2.1 Principe général de la démarche	37
1.2.2 De l'analyse des processus au modèle conceptuel	38
1.2.3 Du modèle conceptuel au modèle informatique	45
1.2.4 La question de l'évaluation et de la validation du modèle	49
I Modélisation de la répartition spatio-temporelle des actions cultur-	59
ales	
2 Analyse des processus de gestion technique pour la modélisation	63
2.1 Introduction	65
2.2 Matériel et Méthodes	68
2.2.1 Le plan d'échantillonnage	68
2.2.2 Les données récoltées	68
2.2.3 Le traitement des enquêtes	70
2.3 Résultats et discussion	71
2.3.1 Une grande variabilité de l'objet cultivé	71
2.3.2 Des niveaux de ressources variables	73
2.3.3 Des modalités de conduites techniques hétérogènes	74
2.4 Conclusion	81
2.4.1 Un nombre limité d'opérations qui modifie l'infiltrabilité et la concen- tration en pesticides mais un grand nombre d'actions à modéliser	81
2.4.2 Des conduites techniques variées sur des parcelles hétérogènes avec de fortes contraintes sur les ressources	81

3	Le modèle DHIVINE	85
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
3.3.4	L'environnement dans DHIVINE	102
3.3.5	Le système opérant dans DHIVINE : les ressources	103
3.3.6	De l'activité au plan : la construction de la stratégie de conduite dans DHIVINE	109
3.3.7	Du plan aux activités réalisées : l'application de la stratégie de conduite dans DHIVINE et son interprétation	115
3.3.8	Quelques éléments d'implémentation et de paramétrisation de DHIVINE	126
3.4	Discussion et conclusion	127
 II Etude et modélisation des processus bio-physiques qui modifient les variables de pression		131
4	Evolution des états de surface sur sols nus et travaillés	135
4.1	Introduction	137
4.2	Materials and methods	138
4.2.1	Study site	138
4.2.2	Classification of soil surface characteristics	140
4.2.3	Data collection	141
4.2.4	Statistical analyses	143
4.3	Results and discussion	146
4.3.1	Characteristics of the data set	146
4.3.2	Selection of the predictor variables	147
4.3.3	Evaluation and comparison of models	149
4.3.4	Examples of SSC predictions over the Roujan catchment	151
4.4	Conclusion	151
5	Structure des communautés d'espèces adventices	159
5.1	Introduction du chapitre	161
5.2	Effet de facteurs agro-pédologiques sur la distribution spatiale des espèces . . .	162
5.2.1	Introduction	162
5.2.2	Matériel et méthodes	162
5.2.3	Résultats	167
5.2.4	Discussion et conclusion	174
5.3	Evolution temporelle des communautés floristiques des agrosystèmes	175
5.3.1	Introduction	175
5.3.2	Matériel et méthodes	175
5.3.3	Résultats	177

5.3.4	Discussion et conclusion	179
5.4	Conclusion sur la structure des communautés d'espèces adventices	180
6	Modélisation de la germination et de la croissance	183
6.1	Introduction	185
6.2	Matériel et méthodes	187
6.2.1	Modélisation de l'émergence	187
6.2.2	Modélisation de la croissance	190
6.2.3	Effets des actions d'entretien du sol sur le couvert herbacé (figure 6.3)	192
6.2.4	Contrôle de cohérence de la modélisation de la dynamique du couvert herbacé	193
6.3	Résultats	194
6.3.1	Paramétrisation des modèles de germination et de croissance	194
6.3.2	Dynamiques de couverture herbacée pour différentes modalités d'entretien du sol	195
6.4	Discussion et conclusion	197
7	Modélisation de l'évolution de l'infiltrabilité	201
7.1	Introduction	203
7.2	Matériel et méthodes	203
7.2.1	L'évolution de l'infiltrabilité dans le cadre de l'évolution des états de surface sur sols nus	204
7.2.2	L'évolution de l'infiltrabilité sous l'effet du développement de la couverture herbacée	205
7.2.3	Contrôle de cohérence de la modélisation de l'évolution de l'infiltrabilité	207
7.3	Résultats et discussion	209
7.3.1	Itinéraire technique 1 : travail du sol (figures 1a et 1b)	209
7.3.2	Itinéraire technique 2 : désherbage chimique (figures 2a et 2b)	209
7.3.3	Itinéraire 3 : combinaison désherbage chimique et travail du sol (figures 3a et 3b)	209
7.3.4	Analyse de l'influence de la charge caillouteuse	210
7.3.5	Synthèse	211
7.4	Conclusion	212
8	Les indicateurs bio-physiques pour la décision	215
8.1	Introduction	217
8.2	Définition de seuils de teneur en eau pour la traficabilité et la travaillabilité des sols	218
8.2.1	Introduction	218
8.2.2	Matériel et méthodes	219
8.2.3	Résultats	222
8.2.4	Discussion	223
8.2.5	Définition d'autres seuils de travaillabilité et de traficabilité	224
8.3	Indicateurs et seuils pour le déclenchement du travail du sol et de la protection phytosanitaire	224
8.4	Conclusion	225

III	Le modèle couplé DHIVINE - MHYDAS	229
9	Des modèles thématiques unitaires au modèle couplé	233
9.1	Introduction	235
9.2	Matériel et méthodes	236
9.2.1	Démarche générale	236
9.2.2	La plateforme OpenFLUID	237
9.3	Résultats	238
9.3.1	Principes techniques de couplage entre DIESE et OpenFLUID	238
9.3.2	Fonctionnement dynamique du couplage	240
9.3.3	Sur la compatibilité des échelles spatiales des modèles	241
9.3.4	Architecture du modèle couplé : les composants et leurs interactions	245
9.4	Discussion et conclusion	248
10	Application du modèle couplé à un cas réel	253
10.1	Introduction	255
10.2	Matériel et Méthodes	255
10.2.1	La zone et la période d'étude	255
10.2.2	Les exploitations agricoles et leurs conduites techniques	257
10.2.3	La paramétrisation du modèle couplé	261
10.2.4	Démarche	265
10.3	Résultats et discussion	267
10.3.1	Les calendriers culturaux à l'échelle de l'exploitation	267
10.3.2	Les itinéraires techniques simulés sur les parcelles	269
10.3.3	Les dynamiques simulées de l'infiltrabilité du sol à l'échelle de la rangée	273
10.3.4	Discussion sur l'effet d'une simplification opérée dans l'application du modèle	280
10.3.5	Les futurs besoins de validation du modèle couplé	281
10.4	Conclusion	282
	Conclusion générale et perspectives	285
11.1	Les principaux résultats	288
11.1.1	DHIVINE, un modèle décisionnel sur les systèmes de culture viticoles pour la représentation des calendriers d'actions culturelles à l'échelle de bassins versants	288
11.1.2	Une modélisation de la dynamique de l'infiltrabilité du sol via la modélisation de l'évolution des états de surface du sol	289
11.1.3	Les indicateurs pour la décision : entre modélisation biophysique et détermination de seuils	291
11.1.4	Le couplage de modèles pour la représentation du fonctionnement d'agro-écosystème : des choix pour rendre compatible les différentes échelles spatiales et temporelles	292
11.1.5	Le modèle couplé DHIVINE - MHYDAS, de la structure théorique à l'application pratique : premiers éléments d'évaluation du modèle	294
11.2	Les perspectives	295

Introduction : positionnement scientifique

Introduction : positionnement scientifique

Le fonctionnement des paysages cultivés est fortement soumis au facteur anthropique. L'intensification de l'agriculture au cours du siècle dernier a largement contribué à l'augmentation des risques environnementaux parmi lesquels se trouvent les risques hydrologiques. Ces derniers ont des conséquences diverses qui impliquent les ressources en eau et en sol, en quantité comme en qualité, mais qui peuvent aussi avoir des conséquences sur les biens et les personnes en cas de crues ou de coulées de boue. La gestion des agro-écosystèmes doit donc aujourd'hui intégrer, en plus des objectifs de production, des objectifs environnementaux pour limiter les risques induits par l'agriculture.

Dans ce cadre, la recherche est sollicitée pour proposer des méthodologies d'évaluation des impacts des systèmes de culture dans la perspective d'élaborer des solutions pour la gestion intégrée des territoires. L'objectif est de fournir les moyens de gérer conjointement à l'échelle du paysage les questions agricoles, la gestion des ressources et l'aménagement des espaces.

Pour cela, la recherche doit produire des outils qui permettent de réaliser une évaluation intégrée des agro-écosystèmes donc multi-critères. Il est alors nécessaire de prendre en compte le fonctionnement global de l'agro-écosystème. Celui-ci dépend des processus biophysiques mais aussi de la gestion humaine et notamment agricole qui est fondée sur des processus de type décisionnels que nous appellerons par la suite processus de gestion technique. Ces processus biophysiques et techniques se déroulant à des échelles spatiales et temporelles différentes, les outils proposés doivent donc intégrer cet aspect multi-échelles du fonctionnement du système. De plus, ils doivent intégrer les relations existantes entre agriculture et fonctionnement de l'éco-système mais aussi à l'inverse entre éco-système et gestion agronomique. Finalement, dans le cadre d'objectifs de gestion, les outils doivent produire des évaluations ex-ante des systèmes.

Dans la littérature, différentes approches traitent de la question de l'évaluation des impacts environnementaux des systèmes de culture pour des objectifs de gestion agro-écologique. On s'est intéressé aux travaux sur les questions hydrologiques et on a cherché à les classer selon (i) qu'ils proposent une approche d'évaluation de la pression, des impacts ou équilibrée entre les deux aspects ; (ii) leur degré de complexité de la représentation des processus de gestion technique d'une part (pour rendre compte de la pression) et des processus hydrologiques d'autre part (pour rendre compte des impacts) ; (iii) du niveau d'interaction entre les types de processus (couplage avec rétro-actions ou par modélisation successive sans rétro-actions). Les différentes catégories de travaux recensés sont présentées selon ces critères dans le tableau 1.

Une première catégorie de travaux concerne les typologies de systèmes de culture. Une

TABLE 1 – Comparaison de quatre types d’approches d’évaluation des impacts hydrologiques des systèmes de culture

Références	Pression			Impact		
	Poids donné à chacun des éléments de l’évaluation	Niveau de complexité	Approche spatiale	Niveau de complexité	Niveau d’interaction	Echelle spatiale de l’évaluation
Bockstaller et al., 1997	Pression >	Représentation normative (parcelle)	Multilocal	Indicateur	Succession	Territoire
Bellon et al., 2001	Pression >	Représentation normative (exploitation)	Multilocal	Indicateur	Succession	Exploitation + Territoire
Dunn et al., 1996 ; Rio et al., 2000 ; Klöcking et al., 2003 ; Biarnès et Colin, 2006	Pression-Impact	Représentation normative	Bassin versant	Modèle mécaniste	Succession	Territoire
CropSyst - Stöckle et al., 2003	Pression >	Règles agronomiques (parcelle)	Multilocal + Bassin versant	Modèle mécaniste	Succession	Territoire
APSIM - Keating et al., 2003 ; IRRIGATE - Merot et Bergez, 2010	Pression >	Règles agronomiques (exploitation)	Multilocal	Modèle mécaniste	Succession	Exploitation
SEAMLESS-APES, Donatelli et al., 2006 ; van Ittersum et al., 2008	Pression-Impact	Règles agronomiques (exploitation)	Multilocal	Indicateur	Succession	Territoire (région)
PALM (Matthews, 2006)	Pression-Impact	Semi normatif avec quelques règles agronomiques	Multilocal	Modèle mécaniste	Rétro-actions	Territoire (100 km ²)
SACADEAU (Cordier et al., 2006)	Pression-Impact	Semi normatif avec quelques règles agronomiques et d’organisation du travail	Bassin versant	Modèle mécaniste	Succession	Territoire (10-100 km ²)

Représentation normative de la pression = rotation et/ou itinéraires techniques prédéfinis par culture, parcelle, zone et/ou type d’exploitation sans prise en compte de la variabilité intra et inter-annuelle lié au climat et à la gestion (agronomique et organisationnelle) des exploitations ou avec une variabilité prédéfinie (par exemple en fonction de scénarii climatiques). *Règles agronomiques* = représentation des systèmes de culture prenant en compte la variabilité liée aux évolutions des états de l’agrosystème et du milieu. *Règles d’organisation du travail* = représentation de la gestion des ressources au sein des exploitations.

Multilocal = représentation des flux verticaux uniquement. *Bassin versant* = représentation des flux verticaux et horizontaux.

approche consiste à catégoriser à l'échelle parcellaire, selon les systèmes de culture, les variables agronomiques qui définissent la pression en unités physiques (dose et fréquence des apports de pesticides ou d'azote, type et nombre de travail du sol, ...) ou sous forme d'indicateurs d'impact (Bockstaller et al., 1997). En connaissance des déterminants de répartition spatiale des systèmes de culture, on peut ainsi définir des cartes de pression et/ou d'impact environnemental (e.g. Mignolet et al., 2003). Cette approche procède donc par aggrégation parcellaire pour représenter les pressions ou les risques d'impacts à l'échelle de territoire via des indicateurs agrégés.

Dans cette même catégorie existent des démarches d'évaluation des pressions ou des risques d'impacts à l'échelle de l'exploitation agricole. Bien que les contraintes d'organisation du travail ne soient pas nécessairement considérées, la prise en compte des contraintes de gestion agricole est ainsi mieux réalisée. Par exemple Bellon et al. (2001) ont réalisé une typologie de vergers sur les risques de pollution par les nitrates. Ils n'ont pas considéré les itinéraires techniques sur les parcelles mais le mode de gestion à l'échelle de l'exploitation pour les opérations culturales contribuant à l'impact environnemental (fertilisation, irrigation, ...). Finalement une évaluation des risques d'impacts à l'échelle du paysage a été réalisée compte tenu de la répartition constatée des types de systèmes de culture par grands types de sols.

D'autres auteurs ont réalisé des typologies à l'échelle de l'exploitation en considérant explicitement les liens de dépendances qui existent entre éco-système et gestion agronomique (Cristofini et al., 1978 ; Morlon, 2005). Bien qu'extérieur aux problématiques hydrologiques, citons l'exemple de Girard et al. (2008) qui ont identifié les stratégies de pâturage des troupeaux en montagne selon leur effet de limitation de l'ensauvagement en montagne et qui montrent que les stratégies dépendent des caractéristiques des territoires des exploitations agricoles.

Pour conclure sur cette première catégorie de travaux, on constate qu'elle se caractérise globalement par une approche d'évaluation des pressions qui sont éventuellement traduites en impacts via des indicateurs. En effet, ce sont les degrés de pression des pratiques agricoles qui sont évalués puis spatialisés pour établir un diagnostic d'impact. Le diagnostic intègre une confrontation entre les pressions induites par l'agriculture et les caractéristiques de l'éco-système. La connaissance des processus biophysiques qui concourent à la réalisation des impacts est alors intégrée à l'évaluation de la pression sur le territoire pour le modérer ou l'aggraver. Les relations entre agriculture et fonctionnement de l'éco-système sont donc pré-établies selon des résultats d'expérimentations le plus souvent réalisées à l'échelle parcellaire.

Une seconde catégorie de travaux s'attache à mieux intégrer les processus biophysiques des éco-systèmes pour évaluer les impacts des systèmes de culture par des variables physiques (débit, évapotranspiration, ...). L'échelle spatiale étudiée est alors celle à laquelle se déroulent les processus hydrologiques : le bassin versant. Par conséquent ces approches procèdent par modélisation car à cette échelle l'expérimentation se trouve être très limitée (Ambroise, 1994). L'évaluation est donc réalisée via des modèles hydrologiques. L'influence des systèmes de culture sur les processus biophysiques est alors représentée via la variation spatio-temporelle de variables d'entrée des modèles hydrologiques.

Plusieurs modèles spatialement distribués ont ainsi été développés qui intègrent l'effet des modes de gestion agricole via une ou plusieurs variables (e.g. Moussa et al., 2002 ; Ludwig et al., 2004). Par conséquent, les études d'évaluation des impacts hydrologiques se sont attachées à définir les liens entre systèmes de culture et variabilité des paramètres d'entrée des modèles hydrologiques. Citons les exemples de Dunn et al. (1996) et Klöcking et al. (2003) en ce qui concerne les questions de bilan hydrique et d'irrigation ; ceux de Benoît et al. (1995) et Sorel (2008) sur les problématiques nitrates ; ceux de Rio et al. (2000) et Biarnès et Colin (2006)

sur les problèmes de pollution de l'eau par les pesticides ; ceux de Cremers et al. (1996) et Joannon (2004) sur les questions d'érosion. La solution classiquement mise en oeuvre dans ces travaux consiste à définir puis spatialiser les déterminants majeurs de la variabilité spatiale des paramètres des modèles hydrologiques dépendante des systèmes de culture (Leenhardt et al., 2010). Par exemple, dans le cadre des études précédemment citées sur le bilan hydrique en zones de polyculture, c'est l'occupation du sol qui a été considérée comme déterminant spatial de l'évapotranspiration. Les auteurs ont donc mis en oeuvre des modèles de spatialisation des systèmes de culture pour définir l'occupation du sol dans un bassin versant. Dans le cas des études sur la pollution de l'eau par les pesticides en zone de monoculture, la modalité d'entretien du sol est le déterminant spatial majeur de la quantité d'herbicide appliquée, il est spatialisé selon les types d'exploitation agricole (Rio et al., 2000) à l'échelle d'un petit bassin versant (1 km²) ou selon les communes (Biarnès et Colin, 2006) à une échelle plus grande (75 km²).

Ces travaux s'intéressent donc principalement au motif spatial des systèmes de culture pour évaluer leurs impacts hydrologiques. La prise en compte de la variabilité temporelle des paramètres des modèles hydrologiques influencés par les systèmes de culture demeure généralement grossière quand elle est considérée sauf si la zone d'étude est suffisamment réduite et étudiée (Rio et al., 2000 ; Joannon, 2004). Ceci tient au fait que, dans ce type d'approche, les itinéraires techniques sont généralement fixés pour une culture donnée et déterminent ainsi les dates des opérations culturales et en conséquence toutes les évolutions des variables d'entrée des modèles hydrologiques (concentration en pesticides ou nitrates au sol, niveau de développement végétatif, rugosité du sol, ...). Différentes raisons expliquent cette situation. Premièrement, une partie des évaluations consiste à modéliser la réponse d'un agro-écosystème soumis à quelques événements pluvieux caractéristiques (e.g. Joannon, 2004 ; Biarnès et Colin, 2006), la composante temporelle des variables est donc de faible utilité, on évalue la caricature d'un système à un moment donné. Deuxièmement, certains auteurs ont constaté une faible variation temporelle de la variable d'entrée. Cremers et al. (1996), par exemple, n'ont majoritairement pas observé d'évolution temporelle significative de la rugosité aléatoire du sol le long du cycle cultural d'une culture donnée. Finalement, la plus forte raison tient à la difficulté de représentation de ces variations temporelles car elles intègrent les contraintes techniques de l'exploitation c'est à dire la gestion temporelle et spatiale des activités agricoles.

En conclusion sur cette seconde catégorie de travaux, on constate que l'intégration des processus biophysiques est mieux réalisée en comparaison des travaux de la première catégorie. Cependant, ces approches ne proposent pas de solution d'intégration des processus de gestion technique dans leur représentation des agro-écosystèmes. Les systèmes de culture sont ainsi plutôt considérés comme des conditions aux limites de l'écosystème et elles sont définies globalement et de manière assez statique suivant les contraintes du milieu et les stratégies générales des agriculteurs.

D'autres approches par modélisation intègrent mieux les processus agro-techniques. Elles constituent une troisième catégorie de travaux qui se caractérise par une problématique plus centrée sur les questions agricoles quand la précédente l'était plus sur l'hydrologie.

Un premier type de démarche, illustrée par le modèle CropSyst (Stöckle et al., 2003), se donne pour objectif d'évaluer les systèmes de culture sur leur productivité mais tout en intégrant des critères d'évaluation environnementale (érosion, teneur en nitrates et salinité des sols) qui constitue des contraintes pour l'agriculture. Le modèle comprend un module de gestion qui permet de paramétrer les itinéraires techniques avec un peu plus de flexibilité que dans les approches précédentes : dates de travaux selon les stades phénologiques par exemple.

Cependant la représentation des processus de gestion technique reste frustrante. La prise en compte des relations entre agriculture et fonctionnement de l'écosystème sont représentées principalement à la parcelle (modèle de croissance, modèle sol-plante) mais un couplage avec un SIG permet également d'intégrer simplement les flux horizontaux à l'échelle d'un bassin versant (CropSyst Watershed).

Un second type de démarche se centre sur l'échelle exploitation pour répondre à des objectifs de gestion (MODERATO, Bergez et al., 2001 ; APSIM, Keating et al., 2003 ; IRRIGATE, Merot et Bergez, 2010). Dans ce cadre, les contraintes de gestion agricole sont bien intégrées et représentées par de la logique conditionnelle. Cependant, selon les approches, la modularité offerte ne permet pas toujours de modifier ces règles de gestion (Merot et Bergez, 2010). Comme pour la démarche précédente, les variables environnementales évaluées le sont principalement pour répondre aux objectifs de gestion des exploitations. Dans le même objectif, ces modèles proposent une modélisation d'une exploitation et ne représentent donc que les flux verticaux à l'échelle d'un ensemble de parcelles sans considérer leurs interactions fonctionnelles liées à leurs positions dans le paysage.

Les approches classées dans cette troisième catégorie sont donc fortement dépendantes de leur entrée agronomique. Réalisée à l'échelle de territoire, l'évaluation de systèmes de culture favorise la modélisation biophysique au dépend de la prise en compte des contraintes de gestion agricole, la représentation des processus hydrologiques est donc plus complète. A l'échelle de l'exploitation, l'évaluation de systèmes de culture permet une bonne prise en compte des contraintes de gestion agricole mais limite alors l'intégration des contraintes physiques aux seuls besoins de cette même gestion agricole.

Une quatrième catégorie de travaux se proposent de représenter les agro-écosystèmes en utilisant des modèles intégrés qui réunissent alors les composantes biophysiques et les composantes de gestion agricole. Les trois exemples trouvés dans la littérature montrent que suivant les échelles spatiales décroissantes, ces modèles intègrent mieux les processus agro-techniques mais aussi les processus biophysiques.

En première place on trouve le projet SEAMLESS (van Ittersum et al., 2008) qui a pour vocation d'évaluer les systèmes agricoles à de larges échelles (de la région à l'Europe) en fonction des questions posées. Le module APES (Agricultural production and externalities simulator) gère les aspects biophysiques en réponse au climat, au sol et aux options de gestion agricoles. Il représente les flux verticaux à l'échelle de la parcelle. Un composant dénommé AgroManagement (Donatelli et al., 2006) permet de représenter partiellement les processus agro-techniques par des règles. Ces règles de logique conditionnelle sont définies pour une culture donnée, elles n'intègrent que l'aspect agronomique de la gestion et pas les contraintes d'organisation du travail présentes à l'échelle de l'exploitation.

Le modèle PALM (Matthews, 2006) se propose de représenter les flux de ressources (carbone, eau, nitrates, travail, ...) à l'échelle de paysage d'une surface de 100 km² environ. C'est un modèle multi-agent qui positionne explicitement les processus agro-techniques à l'échelle des exploitations. Cependant, bien qu'une modélisation dynamique des décisions agricoles soit en projet, le module de gestion agricole n'intègre à notre connaissance que des itinéraires techniques pré-fixés et la gestion de l'organisation du travail est simplifiée : tous les travailleurs d'une exploitation ont les mêmes compétences et les mêmes disponibilités. Par ailleurs la représentation biophysique se limite comme pour APES aux flux verticaux.

Le dernier exemple dans cette catégorie de travaux est le modèle SACADEAU (Cordier et al., 2006) qui évalue les flux d'herbicides dans certains types de bassins versants cultivés. Le modèle hydrologique employé est destiné à des bassins versants de surface moyenne en-

tre 10 et 100 km². Il est couplé avec un modèle décisionnel qui affecte des règles de décision d'application des herbicides à chaque parcelle selon une stratégie donnée. En plus des contraintes agronomiques d'application, le modèle intègre certaines contraintes d'organisation du travail au niveau exploitation sur la disponibilité des ressources en matériel et main d'oeuvre. Cependant le modèle ne considère qu'une culture : le maïs et qu'une opération culturale : le désherbage, par conséquent l'ensemble des processus agro-techniques ne peut être représenté.

En conclusion sur cette dernière catégorie de travaux, les approches intégrées proposent de meilleurs compromis pour la prise en compte conjointe des processus biophysiques et agro-techniques nécessaires à l'évaluation des impacts hydrologiques des systèmes de culture. Cependant, on constate que les modèles restent encore très spécialisés et que les contraintes techniques de l'exploitation, et plus particulièrement les contraintes d'organisation du travail, demeurent insuffisamment intégrées dans les modèles.

La revue des différentes approches d'évaluation des impacts hydrologiques des systèmes de culture montre qu'il existe un déséquilibre entre la représentation des processus biophysiques des éco-systèmes et la représentation des processus techniques des exploitations agricoles qui exploitent ces systèmes. Ce déséquilibre est lié à la spécialisation des approches et aux objectifs principaux qui ont conduit à leur mise en oeuvre : gestion technique des exploitations agricoles, gestion agronomique des cultures, gestion économique des territoires, gestion des ressources. C'est ainsi que dans les approches de modélisation, deux grande voies se distinguent : (i) les approches avec une entrée par la modélisation des processus hydrologiques à l'échelle des bassins versants à des fins d'évaluation environnementale, (ii) les approches avec une entrée par la modélisation agro-biophysique à des fins de gestion technique des exploitations et d'évaluation des performances des systèmes de culture. Les premières approches représentent les processus biophysiques aux échelles et résolutions temporelles et spatiales auxquelles ils se déroulent mais les processus de gestion technique ne sont intégrés que via des variables de forçage des modèles : on spatialise les évolutions temporelles pré-définies de ces variables. Certains modèles ont cherché à rendre moins caricaturales les évolutions temporelles des variables mais la temporalité des actions culturales, sa dépendance aux contraintes d'organisation du travail des exploitations et sa relation avec l'éco-système demeure faiblement prise en compte. Le second type d'approche en cherchant à représenter ce qui se passe à l'échelle de l'exploitation agricole met en oeuvre une modélisation des processus de gestion technique en respectant les échelles et résolutions temporelles et spatiales auxquelles ils se déroulent. Les processus biophysiques peuvent alors être bien modélisés dans le temps mais spatialement ils se limitent aux territoires d'exploitations. Le fonctionnement de l'éco-système bassin versant n'est donc pas intégré.

Dans ces deux grandes approches, on constate qu'il n'y a pas de représentation intégrée des agro-écosystèmes qui permettent d'explorer leurs propriétés dynamiques et leur comportement complexe (Antle et al., 2001). Pour fournir des outils de gestion intégrée des agro-écosystèmes, il est donc nécessaire de mieux représenter leur fonctionnement global. En effet, la gestion de ces systèmes nécessite d'en connaître les leviers. Les outils de gestion doivent donc offrir une représentation multi-échelles des processus biophysiques et de gestion technique et une meilleure prise en compte de leurs inter-dépendances.

Le travail de thèse présenté ici a ainsi pour vocation de contribuer à cet objectif de représentation intégrée des agro-écosystèmes à travers la mise en oeuvre d'un modèle d'évaluation des impacts hydrologiques des conduites techniques d'exploitation. Il se situe donc dans la même voie que certains projets en cours comme le programme ANR ACASSYA (ACcompagner l'évolution Agro-écologique deS SYstèmes d'élevAge dans les bassins versants côtiers) développés

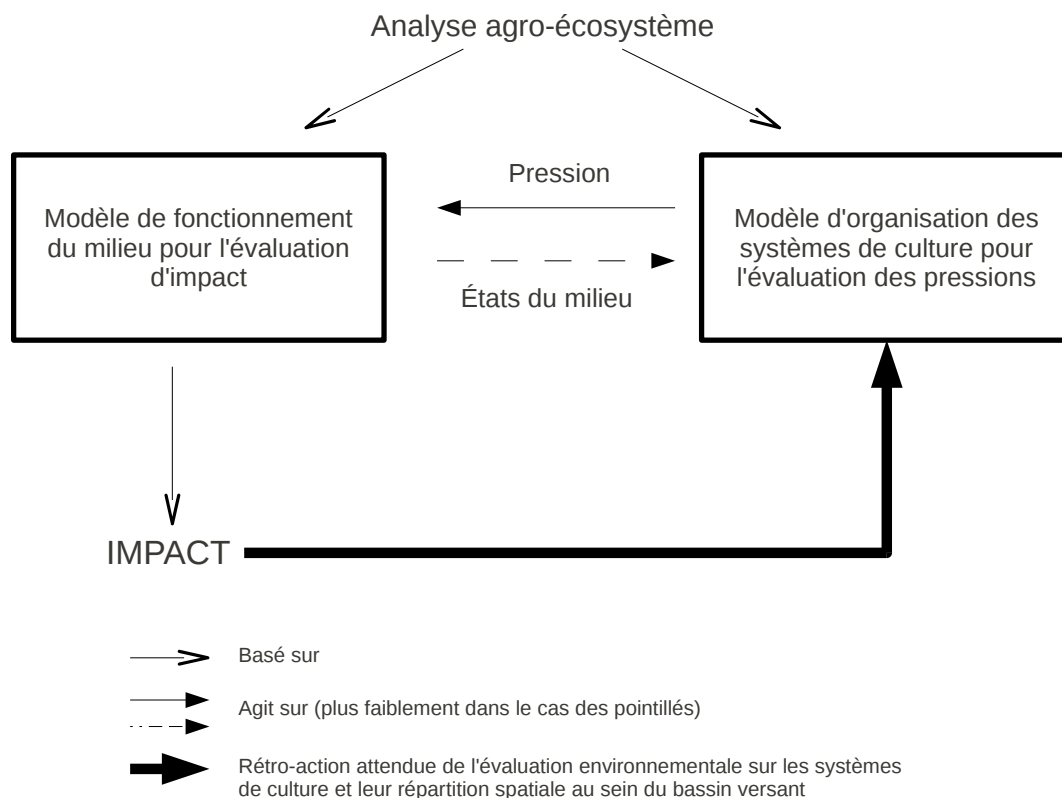


FIGURE 1 – Démarche générique de modélisation couplée pression-impact

en Bretagne sur les problématiques nitrates. Notre hypothèse de travail est la suivante : les impacts hydrologiques des systèmes de culture dépendent de la variabilité spatio-temporelle de variables d'état de l'écosystème modifiées par les actions culturelles. La revue de la littérature montre bien que les modélisations des processus tant biophysiques qu'agro-techniques ont déjà été individuellement mises en oeuvre à leurs échelles spatiales et temporelles propres. L'enjeu est donc de réunir ces processus dans une modélisation intégrative à l'échelle de l'agro-écosystème dans l'objectif finalisé de produire un outil d'expérimentation virtuelle.

Le travail de thèse s'intéresse particulièrement à l'évaluation environnementale des systèmes de culture. La démarche générique de modélisation suivie est présentée par la figure 1. On cherche à représenter le fonctionnement du milieu en interaction avec la gestion technique des cultures pour déterminer les impacts des systèmes de culture. Les interactions sont représentées au travers de variables de couplage. Ces variables ne peuvent être définies de manière générique quelque soit le système de culture, le milieu et le type d'impact environnemental concernés. Elles découlent donc d'une analyse spécifique et simultanée (i) du fonctionnement environnemental du milieu et (ii) de l'organisation des systèmes de culture (caractéristiques, répartition spatiale, décisions qui sont à leur origine). La pression des systèmes de culture sur le milieu s'exerce via les pratiques qui influencent l'évolution de variables d'état du milieu clés pour le fonctionnement pédo-hydrologique. Inversement, certains états du milieu liés au fonctionnement pédo-hydrologique influencent (directement ou indirectement) les pratiques des agriculteurs. La thèse a donc pour but de produire un modèle de connaissance multi-échelles qui intègre les processus à l'origine de la variabilité de ces variables de couplage. Dans un premier temps, le choix est fait de réduire les objectifs d'évaluation des systèmes de culture à

des considérations environnementales et non agronomiques. Pour construire le modèle, on se place à l'échelle d'un cycle cultural et dans le cadre de bassins versants petits à moyens (1 à 100 km²) sur lesquels les conduites techniques des exploitations agricoles sont stabilisées. Dans ce contexte, l'apport principal attendu du travail de thèse se situe au niveau de l'intégration de la temporalité des états de l'agro-écosystème liés aux processus agro-techniques dans une modélisation hydrologique à l'échelle bassin versant. En effet, dans les approches existantes ce n'est pas tant la spatialisaton des états du système que leur dynamique qui est faiblement représentée. La question de recherche à laquelle ce travail tente de répondre est donc la suivante : *Comment paramétrer dynamiquement, pour un modèle hydrologique, les variables d'état d'un agro-écosystème modifiées par les actions culturales dans le but d'évaluer les impacts hydrologiques des pratiques agricoles à l'échelle de petits bassins versants ?* Cette question implique spécifiquement d'identifier les variables et processus de couplage entre actions agricoles et impacts hydrologiques, d'analyser les échelles caractéristiques de ces processus aux plans temporel et spatial et d'en rechercher des représentations compatibles entre elles.

Le cas d'étude envisagé concerne l'impact environnemental des systèmes viticoles languedociens sur la qualité de l'eau. Le cas d'application ainsi que la démarche opérationnelle réalisée pour répondre à cette question de recherche sont présentés au chapitre 1.

La mise en oeuvre de la démarche et les résultats obtenus sont présentés dans trois parties.

La première partie présente la modélisation de la répartition spatio-temporelle des actions culturales en s'intéressant à l'analyse des processus de gestion techniques (chapitre 2) et à leur modélisation (chapitre 3).

La seconde partie présente l'étude et la modélisation des processus bio-physiques qui déterminent directement ou indirectement le fonctionnement hydrologique du milieu. La dynamique de l'infiltrabilité de la surface du sol est l'un des processus à effet direct sur les processus hydrologiques. Son analyse et sa modélisation sont présentés dans quatre chapitres. L'évolution des états de surface sur sols nus et travaillés est présentée au chapitre 4. Le développement de la végétation spontanée après travail du sol ou désherbage chimique est présenté aux chapitres 5 et 6. Le chapitre 5 présente une étude des structures des communautés d'espèces adventices. La modélisation de la germination et de la croissance des espèces est ensuite présentée au chapitre 6. Le chapitre 7 présente enfin une modélisation de la dynamique de l'infiltrabilité à partir de la représentation de la dynamique des états de surface du sol abordée dans les chapitres 4, 5 et 6. La seconde partie est composée d'un dernier chapitre (chapitre 8) sur les processus biophysiques qui déterminent indirectement le fonctionnement hydrologique du milieu en modifiant la répartition spatio-temporelle des actions des agriculteurs.

La troisième partie présente le modèle couplé pression-impact. Le couplage des modèles est abordé au chapitre 9 et une application du modèle à un cas réel est présentée au chapitre 10.

Finalement, un ultime chapitre apporte les conclusions et les perspectives de ce travail.

Bibliographie

- Ambroise, B. (1994). Du BVRE, bassin versant représentatif expérimental, au BVR, bassin versant de recherche. In *Du concept de BVRE à celui de zone atelier dans les recherches menées en eaux continentales (Actes du séminaire de Paris, Mai 1994)*, pages 11–25. Houi D. et Verrel J.L., CEMAGREF, Antony, France, CEMAGREF editions edition.
- Antle, J. M., Capalbo, S. M., Elliott, E. T., Hunt, H. W., Mooney, S., and Paustian, K. H. (2001). Research needs for understanding and predicting the behavior of managed ecosystems : lessons from the study of agroecosystems. *Ecosystems*, 4(8).
- Bellon, S., Lescourret, F., and Calmet, J. (2001). Characterisation of apple orchard management systems in a french mediterranean vulnerable zone. *Agronomie*, 21(3) :203–213.
- Benoît, M., Saintot, D., and Gaury, F. (1995). Mesures en parcelles d’agriculteurs des pertes en nitrates. variabilité sous divers systèmes de culture et modélisation de la qualité de l’eau d’un bassin d’alimentation. *Comptes Rendus de l’Académie d’Agriculture de France*, 81(4) :175–188.
- Bergez, J., Debaeke, P., Deumier, J., Lacroix, B., Leenhardt, D., Leroy, P., and Wallach, D. (2001). MODERATO : an object-oriented decision tool for designing maize irrigation schedules. *Ecological Modelling*, 137(1) :43–60.
- Biarnes, A. and Colin, F. (2006). Methodology to assess the hydrological impact of weed control practices with a view to management of mediterranean winegrowing catchments. *International Journal of Sustainable Development*, 9(2).
- Bockstaller, C., Girardin, P., and vanderWerf, H. (1997). Use of agro-ecological indicators for the evaluation of farming systems. *European Journal of Agronomy*, 7(1-3) :261–270.
- Cordier, M., Tortrat, F., Trepos, R., Aurousseau, P., Chanomordic, B., Falchier, C., Gascuel-Oudou, C., Garcia, F., Heddadj, D., Lebouille, L., and Masson, V. (2006). Modélisation du transfert des herbicides dans un bassin versant en vue de la construction d’un outil d’aide à la décision pour la maîtrise de la qualité des eaux. In *Qualité de l’eau en milieu rural. Savoirs et pratiques dans les bassins versants*, pages 219–225. Merot, Ph.
- Cremers, N. H. D. T., van Dijk, P. M., de Roo, A. P. J., and Verzandvoort, M. A. (1996). Spatial and temporal variability of soil surface roughness and the application in hydrological and soil erosion modelling. *Hydrological Processes*, 10(8).
- Cristofini, B., Deffontaines, J., Raichon, C., and Verneuil, B. D. (1978). Pratiques d’élevage en castagniccia. exploration d’un milieu naturel et social en corse. *Etudes Rurales*, 71-72 :89–109.

- Donatelli, M., van Evert, F., di Guardo, A., Adam, M., and Kansou, K. (2006). A component to simulate agricultural management. In *iEMSs Third Biannual Meeting "Summit on Environmental Modelling and Software"*. Voinov, A., Jakeman, A., Rizzoli, A.E., Burlington, USA, international environmental modelling and software society edition.
- Dunn, S., Mackay, R., Adams, R., and Oglethorpe, D. (1996). The hydrological component of the NELUP decision-support system : An appraisal. *Journal of Hydrology*, 177(3-4) :213–235.
- Girard, N., Duru, M., Hazard, L., and Magda, D. (2008). Categorising farming practices to design sustainable land-use management in mountain areas. *Agronomy for Sustainable Development*, 28(2) :333–343.
- Joannon, A. (2004). *Coordination spatiale des systèmes de culture pour la maîtrise de processus hydrologiques. Cas du ruissellement érosif dans les bassins versants agricoles du Pays de Caux, Haute Normandie*. PhD thesis, Agroparistech.
- Keating, B., Carberry, P., Hammer, G., Probert, M., Robertson, M., Holzworth, D., Huth, N., Hargreaves, J., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K., Asseng, S., Chapman, S., McCown, R., Freebairn, D., and Smith, C. (2003). An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, 18(3-4) :267–288.
- Klocking, B., Strobl, B., Knoblauch, S., Maier, U., Pfutzner, B., and Gericke, A. (2003). Development and allocation of land-use scenarios in agriculture for hydrological impact studies. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28(33-36) :1311–1321.
- Leenhardt, D., Angevin, F., Biarnès, A., Colbach, N., and Mignolet, C. (2010). Describing and locating cropping systems on a regional scale. a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30(1).
- Ludwig, B., Bissonais, Y. L., Souchere, V., Cerdan, O., and Jetten, V. (2004). Intégration des pratiques agricoles dans la modélisation du ruissellement et de l'érosion des sols : les modèles LISEM et STREAM. In *Organisation spatiale des activités agricoles et processus environnementaux*, Science Update. P. Monestiez, S. Lardon, B. Seguin, INRA édition edition.
- Matthews, R. (2006). The people and landscape model (PALM) : towards full integration of human decision-making and biophysical simulation models. *Ecological Modelling*, 194(4) :329–343.
- Merot, A. and Bergez, J. (2010). IRRIGATE : a dynamic integrated model combining a knowledge-based model and mechanistic biophysical models for border irrigation management. *Environmental Modelling & Software*, 25(4) :421–432.
- Mignolet, C., Schott, B., Mari, J., and Benoît, M. (2003). Typologies des successions de cultures et des techniques culturales dans le bassin de la seine. Paris.
- Morlon, P. (2005). La dimension spatiale des pratiques agricoles : une approche agronomique. In *Agricultures et territoires*, Information géographique et aménagement du territoire, pages 175–190. C. Laurent et P. Thinon, Paris, hermès science - lavoisier edition.

- Moussa, R., Voltz, M., and Andrieux, P. (2002). Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood events. *Hydrological Processes*, 16(2).
- Rio, P., Causeret, F., Andrieux, P., Dejean, C., Frot, E., and Louchart, X. (2000). Regulation of herbicide pollution in vineyard : a simulation in a mediterranean area. *Economie Rurale*, (259).
- Sorel, L. (2008). *Paysages virtuels et analyse de scénarios pour évaluer les impacts environnementaux des systèmes de production agricole*. PhD thesis, Agrocampus Ouest.
- Stöckle, C., Donatelli, M., and Nelson, R. (2003). CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*, 18(3-4) :289–307.
- van Ittersum, M., Ewert, F., Heckelei, T., Wery, J., Olsson, J., Andersen, E., Bezlepkina, I., Brouwer, F., Donatelli, M., Flichman, G., Olsson, L., Rizzoli, A., van der Wal, T., Wien, J., and Wolf, J. (2008). Integrated assessment of agricultural systems - a component-based framework for the european union (SEAMLESS). *Agricultural Systems*, 96(1-3) :150–165.

Chapitre 1

Cas d'application et démarche

Sommaire

1.1	Cas d'application : la plaine viticole languedocienne	29
1.1.1	La problématique environnementale : la pollution de l'eau par les pesticides	29
1.1.2	Les systèmes de culture viticoles	30
1.1.3	Le contexte paysager	32
1.1.3.1	Caractéristiques physiques	32
1.1.3.2	Caractéristiques du climat méditerranéen	36
1.1.4	Fonctionnement hydrologique général des bassins versants de la zone d'étude	36
1.1.5	Bilan sur les déterminants de la pollution de l'eau par les pesticides	37
1.2	Modélisation couplée pression-impact	37
1.2.1	Principe général de la démarche	37
1.2.2	De l'analyse des processus au modèle conceptuel	38
1.2.2.1	Les processus décisionnels	39
1.2.2.2	Les processus biophysiques	43
1.2.2.3	Synthèse	45
1.2.3	Du modèle conceptuel au modèle informatique	45
1.2.3.1	Le modèle hydrologique	45
1.2.3.2	Le modèle décisionnel	46
1.2.3.3	Les modèles biophysiques	46
1.2.3.4	Le couplage des modèles	49
1.2.4	La question de l'évaluation et de la validation du modèle	49

Chapitre 1

Cas d'application et démarche

Le travail de thèse a pour objectif de produire un modèle d'évaluation ex-ante des impacts hydrologiques des systèmes de culture. Dans ce chapitre nous présentons le cas d'application sur lequel a été réalisé le travail pour cerner les problématiques hydrologiques spécifiques aux systèmes de culture étudiés et à leur milieu. Ensuite, la démarche opérationnelle mise en oeuvre pour traiter du cas d'étude est présentée.

1.1 Cas d'application : la plaine viticole languedocienne

En Languedoc Roussillon (première région viticole française avec 30% de la surface nationale en vignes), près d'un tiers de la surface agricole utile est cultivée en vignes. Compte tenu de la répartition spatiale des zones de production liées aux appellations des vins, ces dernières sont le plus souvent des zones de monoculture. Le cas d'application porte sur ces systèmes de culture viticole languedocien et concerne plus particulièrement la vallée de la Peyne (basse vallée de l'Hérault) située dans la partie sud-ouest du département de l'Hérault, à une soixantaine de kilomètres à l'ouest de Montpellier (figure 1.1). La zone d'étude pour le travail de thèse est représentative de la basse vallée de l'Hérault et se structure autour de deux bassins versants emboîtés : le bassin de la Peyne de 75 km² qui comprend le bassin versant de Roujan de 1 km².

Dans cette partie qui présente le cas d'application, un état des lieux de la problématique environnementale est introduit avant de présenter les systèmes de culture, le milieu et les processus hydrologiques qui y concourent. Finalement, en se basant sur l'ensemble de ces éléments, on réalise un bilan des déterminants du problème environnemental.

1.1.1 La problématique environnementale : la pollution de l'eau par les pesticides

Dans le Sud de la France, les inventaires régionaux de la qualité de l'eau réalisés en 1997 et 1999 (Agence de l'eau RMC, 1998 et 2000), ont montré que plus de 65% des eaux de surface et 80% des eaux souterraines sont contaminées par des pesticides. Plus de 50% des matières actives retrouvées sont des molécules d'herbicides. Face à cette constatation, l'utilisation de certaines molécules à caractère toxique a été interdite. On citera à titre d'exemple : simazine, lindane, diquat, paraquat, ou diuron pur pour le désherbage chimique. Cette décision suit la logique des mesures prises dans le but de limiter l'impact des pesticides sur la santé humaine. En effet, selon les conditions d'emploi, ces matières sont susceptibles de se retrouver dans l'eau, et de provoquer d'importantes perturbations sur les écosystèmes et sur l'homme. Par

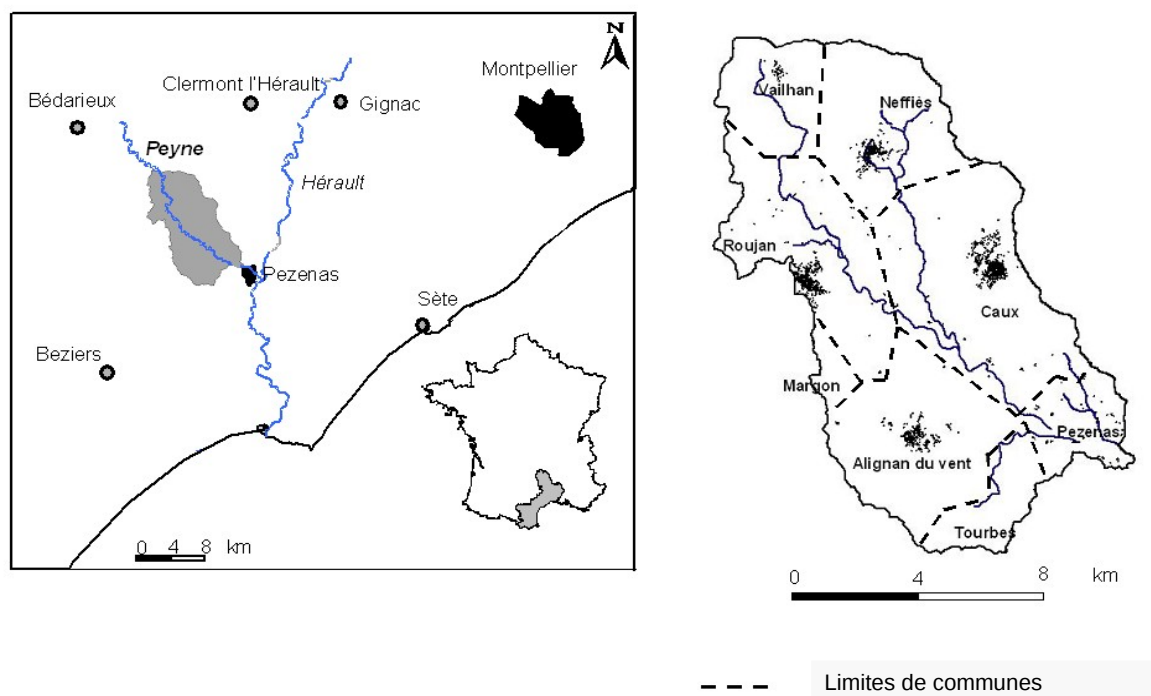


FIGURE 1.1 – Localisation géographique de la zone d'étude

exemple, une étude récente de la DASS a montré que 18% de la population de l'Hérault, département de la zone d'étude, est concernée par des dépassements ponctuels de la norme admise de pesticides dans l'eau de consommation, et 1% par des dépassements réguliers (AME, 2003). Le constat des dangers potentiels d'un recours excessif aux pesticides, a logiquement porté les pouvoirs publics et les agriculteurs à tenter de réduire leur utilisation. La stratégie d'emploi systématique de produits phytosanitaires est aujourd'hui montrée du doigt, dans une région où la consommation moyenne de pesticides atteint 28kg/ha, soit plus du double de la moyenne française (12kg/ha), ce qui est lié à l'importance de la viticulture (AME, 2003).

Nous allons donc dans la suite de la présentation du cas d'étude, présenter les éléments qui contribuent à expliquer les problèmes de pollution des eaux par les pesticides.

1.1.2 Les systèmes de culture viticoles

La vigne, une culture pérenne... Les systèmes de culture viticoles, comme tous les systèmes à base de plantes pérennes, sont établis pour un horizon de temps long puisque la vigne peut être cultivée durant plusieurs dizaines d'années, certaines vignes pouvant être centenaires (Champagnol, 1984). Trois phases peuvent être distinguées au cours du cycle de la vigne : le développement végétatif, le développement reproducteur et le repos hivernal (dormance) (figure 1.2). En France, le cycle de la vigne peut s'étendre de fin mars à novembre, suivant les régions et les cépages.

La vigne est une plante à croissance indéterminée, ce qui suppose une optimisation du rapport croissance végétative / charge en fruits pour atteindre les objectifs de production et

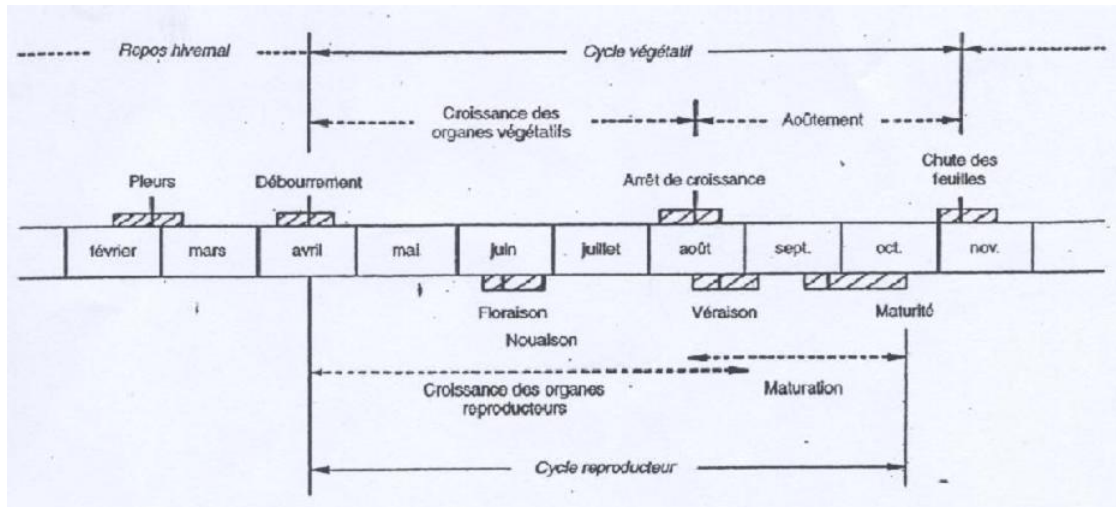


FIGURE 1.2 – Cycle végétatif et reproducteur de la vigne

de qualité. Les techniques permettant de parvenir à cela sont diverses : la taille hivernale lors de la dormance et l'ébourgeonnage en début de cycle pour limiter le nombre de bourgeons par plante venant à se développer, le rognage pour limiter la vigueur végétative au cours du cycle, et l'égrappage qui vise à limiter la charge en grappes. Ces travaux sont définis comme les travaux fondamentaux de la culture de la vigne (Jourdan, 1994).



FIGURE 1.3 – Photo d'une parcelle de vigne vue du ciel

...qui couvre peu le sol ... La vigne est cultivée en rangs. On distingue donc deux entités de surface sur une parcelle : le rang et l'inter-rang. Cette organisation spatiale des parcelles de vignes en rangées laisse de larges surfaces de sol non couvertes par la vigne. Les replantations progressives en nombre dans la région Languedoc Roussillon (Touzard, 1998) ont renforcé cette situation en généralisant la conduite de vignes palissées qui permettent la mécanisation du vignoble : les inter-rangs ont été élargis (de 1,5-1,6m à 2 voire 3m) et la végétation de la vigne contenue par des fils pour laisser entrer les tracteurs dans les parcelles. Le sol est donc majoritairement non couvert par la vigne (figure 1.3).

... et consomme beaucoup de pesticides Du fait de l'organisation de la vigne en rangées, aux travaux fondamentaux définis précédemment s'ajoutent les opérations d'entretien du sol qui concernent aussi bien le rang que l'inter-rang. Parmi les travaux définis comme les travaux effectués pour maintenir le vignoble sain et en bon état, on trouve également les opérations de protection de la culture et, éventuellement, les opérations de fertilisation et d'irrigation. Ces travaux ne sont pas obligatoirement réalisés chaque année. Dans un vignoble idéal (sans mauvaises herbes, sans risques de maladies et avec suffisamment d'eau), ils n'auraient pas besoin d'exister (Jourdan, 1994). Ce sont ces travaux qui amènent un usage important de pesticides. En effet, d'après Aubertot et al. (2005), 20 % de la consommation (en masse)

pourrait être imputée à la viticulture alors qu'elle ne représente que 4% de la SAU française. Cette situation s'explique par l'efficacité avérée des méthodes de lutte chimique, et le manque de méthodes alternatives.

En effet, face aux agents de perte de récolte (mildiou, oïdium, adventices), l'ensemble des viticulteurs considère la protection chimique obligatoire pour tout ou partie du cycle, et tout ou partie de la surface des parcelles. Face aux agents de baisse de qualité (pourriture grise, vers de grappe, acariens), les traitements chimiques sont réalisés systématiquement dans les vignobles d'un certain potentiel qualitatif seulement (AOC, haut de gamme, cave particulière). Enfin, face aux agents de dépérissement ou de dégénérescence, la lutte chimique est rendue obligatoire de façon réglementaire si l'agent constitue une menace de destruction du patrimoine national (dans la zone d'étude, c'est le cas de la flavescence dorée). Ainsi, la lutte chimique est considérée comme la solution quasi-unique face à la multitude de parasites présents dans le vignoble. Ceci explique le nombre de traitements très élevé, réalisés par unité de surface lors de chaque saison culturale. Dans la zone d'étude, si l'on comptabilise toutes les applications effectuées pour tous les bio-agresseurs, le nombre de traitements effectués par an dépasse généralement la vingtaine. On observe tout de même une forte disparité inter-exploitations quant aux quantités de pesticides employés. Mais, de façon générale, les pulvérisations de fongicides sont majoritaires, visant principalement deux maladies, l'oïdium et le mildiou. Puis les herbicides précèdent de peu les insecticides, en quantité épanchée, en kg de matière active par hectare (Clerjeau, 2004).

1.1.3 Le contexte paysager

1.1.3.1 Caractéristiques physiques



Photographe : Y. Blanca

FIGURE 1.4 – Paysage de la basse vallée de la Peyne (1)

Les paysages de la vallée de la Peyne sont contrastés, avec en amont de Vailhan, au Nord-Ouest d'une ligne reliant Roujan à Neffies, une zone de reliefs non cultivés, couverts de garrigues (contreforts de la montagne Noire), et en aval, un relief plus vallonné (20 à 130m d'altitude) (figure 1.4). La vigne y est dominante, même si quelques grandes cultures sont présentes (blé dur en majorité). Le reste de la végétation est constitué de landes et bosquets de pins et chênes sur les talus en pentes plus fortes et les sommets de buttes (figure 1.5).



Photographe : Y. Blanca

FIGURE 1.5 – Paysage de la basse vallée de la Peyne (2)

Dans les zones en vigne, le paysage est très anthropisé : le parcellaire est très morcelé car les parcelles de vignes ont des surfaces moyennes faibles (de l'ordre d'1 ha), sur les pentes des terrasses ont été aménagées et le réseau de fossés est dense (figure 1.6).

Le substratum général de la basse vallée de la Peyne est constitué par des formations marines et laguno-lacustres marneuses et gréseuses datant du Miocène : les molasses (Bonfils, 1993). La zone amont non cultivée, est plus accidentée. Elle est constituée de sols sur substrat quartzique. La zone aval, partie basse concentrant l'essentiel du vignoble du bassin versant peut être décomposée en plusieurs sous unités morphologiques (figure 1.7) aux caractéristiques pédologiques variables (Lagacherie et al., 2004) :

- Les « terrassettes » où affleurent les molasses. Ces zones ont été façonnées par l'homme pour lutter contre l'érosion ; des calcosols se sont développés, sols calcaires lithochromes¹, peu à moyennement profonds, de texture sableuse à limono-argilo- sableuse.

Les phénomènes de colluvionnement récent des molasses ont différencié deux unités géomorphologiques en aval des terrassettes :

- Les zones de glacis : elles sont faiblement pentues, occupées par des calco-colluviosols : sols calcaires lithochromes, profonds, de texture limono-sablo-argileuse.

1. sol dont la couleur est héritée directement de la roche mère



Photographe : N. Paré

FIGURE 1.6 – Paysage de la basse vallée de la Peyne (3)

- Les zones de dépression : on y trouve des colluviosols à horizon rédoxique de profondeur. Il s'agit de sols calcaires profonds, de texture limono-sablo-argileuse et présentant des risques d'engorgement.

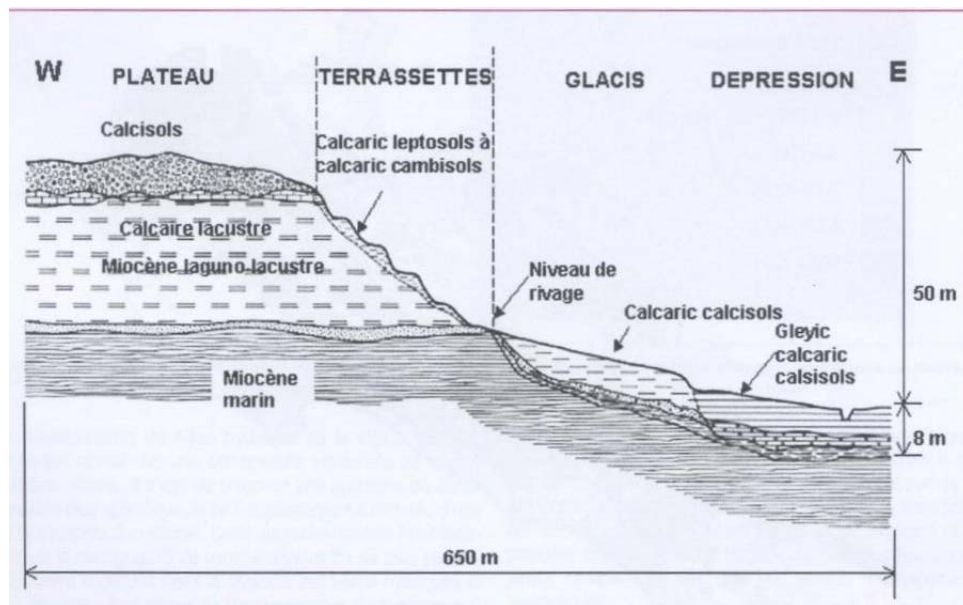


FIGURE 1.7 – Coupe géo-pédologique des sols de la Peyne

Des dépôts alluviaux se sont ajoutés sur les formations molassiques. Les dépôts varient dans le paysage (figure 1.8) suivant un ordre chronologique ; sur les points hauts se trouvent :

- Les zones de « plateaux pliocènes », où on trouve des brunisols, sols calciques ou calcaires, rougeâtres, caillouteux en surface, de texture limono-argilo-sableuse, ainsi que des calcosols argileux issus de marnes datant de la phase marine de l'époque pliocène.
- Les zones de « terrasses villafranchiennes » où se sont développés des fersialsols calciques ainsi que des fersialsols carbonnatés.



Photographe : Y. Blanca

FIGURE 1.8 – Paysage de la basse vallée de la Peyne (4)

En position intermédiaire, on trouve :

- Les zones de « terrasses alluviales würmiennes » occupées par des brunisols. Il s'agit de sols bruns appauvris, peu acides, peu caillouteux en surface, à niveau de galets en profondeur, de texture sablo-limoneuse.

Dans la partie basse de la vallée de la Peyne, se situent :

- Les zones de plaine alluviale, autour de Pézenas et en bordure de la Peyne et de ses affluents (en dessous de Roujan et de Neffiès). Des fluvisols se sont formés dans cette zone alluviale actuelle. Ce sont des sols peu évolués, profonds, de texture limoneuse, généralement calcaires, issus des alluvions du lit majeur des affluents de l'Hérault. Les potentialités agronomiques pour la vigne de ces sols sont élevées.

1.1.3.2 Caractéristiques du climat méditerranéen

La zone d'étude est soumise à un climat de type méditerranéen sub-humide à saison sèche prolongée. La pluviométrie annuelle moyenne enregistrée sur les stations de Météo France des environs sur une période de trente années est de l'ordre de 650 mm (70 à 80 jours de pluie) par an. Comme l'illustre le tableau 1.1, le régime pluviométrique est caractérisé par une forte variabilité inter et intra-annuelle.

TABLE 1.1 – Pluviométrie mensuelle et annuelle moyenne (\bar{P}), en mm, mesurée à la station météorologique du bassin versant de Roujan de 1993 à 2003. Ecart types, σ .

Année	Jan.	Fev.	Mar.	Avr.	Mai	Jun.	Jui.	Aoû.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Annuel
\bar{P}	81	55	31	50	53	35	23	50	91	112	117	90	788
σ	118	72	35	25	44	29	23	35	60	77	109	93	353

A titre d'exemple, pour l'année 1996, 1600 mm ont été relevés contre seulement 304 pour 1998. Ce régime est en outre marqué par l'alternance de périodes aux pluies à fortes intensités et de périodes de sécheresse prolongée. Deux types d'évènement de pluie peuvent être distingués :

- les évènements d'été qui correspondent à des orages de forte intensité et de courte durée ;
- les évènements du reste de l'année (principalement automne et printemps) qui correspondent à des précipitations de volume plus important et le plus souvent d'intensité plus faible.

La température moyenne annuelle est de 14°C et l'évapotranspiration potentielle calculée par la méthode de Penman est de plus de 1000 mm (données mesurées à Roujan) .

1.1.4 Fonctionnement hydrologique général des bassins versants de la zone d'étude

A l'échelle de la parcelle, les écoulements de surface sont uniquement de nature Hortonienne (Voltz et al., 1996), c'est à dire qu'ils sont provoqués par le dépassement des capacités d'infiltration du sol par les intensités de pluie (Horton, 1933), c'est à dire quand l'intensité de la pluie est supérieure à la vitesse d'infiltration et après que la capacité de flaquage est dépassée. La pérennité et la discontinuité du couvert de la vigne expose directement une partie importante de la surface du sol aux précipitations. Dès lors, les écoulements sont rapides et leurs intensités sont étroitement liées à celles des pluies, mais aussi à l'humidité de la surface du sol et aux pratiques culturales (Andrieux et al., 1996). Les surfaces qui subissent un travail du sol ruissellent moins que les autres (Andrieux et al., 2001). Toutefois, au delà d'une certaine hauteur d'eau précipitée, les humidités et les pratiques culturales n'ont plus d'incidence sur la lame d'eau ruisselée.

A l'échelle du bassin versant, des expériences géochimiques à l'aide de traceurs (Ribolzi et al., 2000) montrent que lors d'une pluie importante, la composante principale du débit à l'exutoire est le ruissellement. La contribution moyenne du ruissellement sur la totalité de l'évènement est comprise entre 12 et 82% suivant l'importance de l'évènement pluvieux. Les pluies importantes entraînent des débits forts dont la composante due au ruissellement joue un

rôle prépondérant. Ce fonctionnement est une caractéristique de ces types de bassins agricoles anthropisés. Les écoulements souterrains ne se feraient ressentir qu'en fin d'écoulement.

1.1.5 Bilan sur les déterminants de la pollution de l'eau par les pesticides

Dans le contexte des systèmes de culture viticole languedocien, différents éléments déterminent la pollution de l'eau par les pesticides (Voltz et al., 1996) :

- La pollution des eaux de surface est liée au ruissellement de l'eau sur les parcelles lors des événements pluvieux de forte intensité. En effet, le ruissellement entraîne les molécules de produits chimiques présentes au sol directement dans les cours d'eau.
- Le déclenchement du ruissellement à la parcelle dépend des états de surface du sol, qui sont liés aux techniques d'entretien du sol mises en œuvre. Le désherbage chimique est le type d'entretien du sol à l'origine d'un état de surface potentiellement le plus ruisselant, par formation d'une croûte permanente en surface. En revanche, le travail mécanique du sol et l'enherbement créent des états de surface moins ruisselants.
- La concentration des eaux de ruissellement en pesticides dépend, entre autres, des quantités de pesticides épandues sur les parcelles, et du nombre de jours écoulés entre la date d'épandage et l'évènement pluvieux ruisselant : selon le temps écoulé, il y a possibilité de dégradation des matières actives qui n'ont pas encore ruisselé, mais cette dégradation est ralentie ou stoppée au-delà d'une certaine température. Il est donc possible d'observer une pollution par les pesticides en septembre, bien que les épandages aient été arrêtés au printemps ou en début d'été.

En conclusion, dans un contexte de climat méditerranéen associé aux processus de ruissellement de type Hortonien, les risques de pollution augmentent avec l'augmentation de la quantité de produit épandu, et en présence d'états de surface favorables au ruissellement par présence d'une croûte superficielle. Les impacts hydrologiques dans ces systèmes sont donc fortement dépendants de la rencontre de conditions climatiques et d'états du système sous dépendance agronomique (présence de pesticides, états de surface des sols). Le cas des systèmes de culture viticole languedocien est donc particulièrement pertinent pour tester notre hypothèse de travail sur le lien entre impacts hydrologiques et variabilité spatio-temporelle de l'état de l'agro-écosystème liés aux actions culturelles.

1.2 Modélisation couplée pression-impact

1.2.1 Principe général de la démarche

On présente dans cette partie la démarche opérationnelle mise en œuvre au cours de la thèse dans le contexte de la problématique qu'est la réduction des impacts sur la ressource en eau de l'usage des pesticides en viticulture languedocienne. On rappelle que l'objectif du travail est de proposer un modèle d'évaluation des impacts hydrologiques des pratiques agricoles qui intègrent les échelles multiples des processus et qui permettent l'évaluation ex-ante des agro-écosystèmes. La démarche est présentée par la figure 1.9.

La première étape consiste à analyser l'ensemble des processus de l'agro-écosystème pour définir un modèle conceptuel de fonctionnement. On présente un état général des connaissances sur ces processus pour expliciter le fonctionnement de l'agro-écosystème vis à vis de la pollution de l'eau et donc les choix effectués pour dessiner le modèle conceptuel. Puis à partir de ce

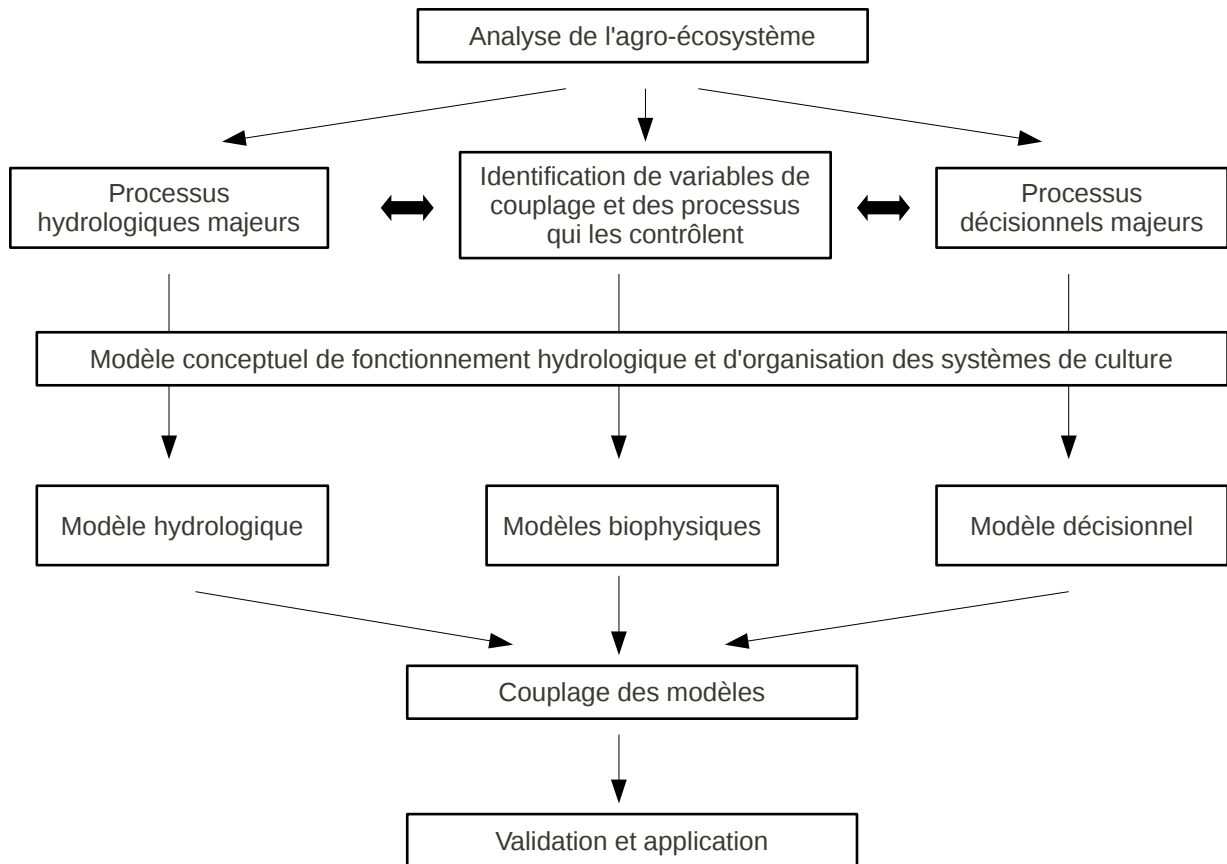


FIGURE 1.9 – Diagramme de la démarche de modélisation couplée pression-impact

modèle conceptuel, la seconde étape consiste à construire un modèle informatique par couplage de modèles unitaires représentant les différents types de processus. On présente alors les grandes lignes des démarches de modélisation mises en oeuvre au cours de la thèse. Finalement, on présente dans une dernière partie des éléments d'évaluation de modèle couplé de ce type.

1.2.2 De l'analyse des processus au modèle conceptuel

Le modèle conceptuel défini dépend de la problématique étudiée et se construit autour des variables de couplages identifiées comme déterminantes des interactions entre les processus décisionnels et hydrologiques et que l'on nomme variables de pression. Lors de la présentation du cas d'application, on a présenté les déterminants de la pollution de l'eau par les pesticides. D'un point de vue hydrologique, compte-tenu du fonctionnement général des bassins versants, le processus majeur qui concourt à la réalisation de l'impact est le ruissellement par lessivage des molécules de pesticides présentes au sol. Le ruissellement se déclenche essentiellement lors du dépassement de la capacité d'infiltration du sol (ruissellement Hortonien). Or, l'infiltrabilité dépend des états de surface du sol liés aux modalités d'entretien du sol mises en oeuvre par les viticulteurs. De plus, la pollution de l'eau dépend logiquement des applications de pesticides par les viticulteurs. *Les impacts des pratiques culturales vont donc se réaliser via la modification dans l'espace et dans le temps de ces deux variables : concentration en matières actives au sol et infiltrabilité de la surface du sol.* C'est donc autour d'elles que s'est construit le modèle conceptuel de fonctionnement de l'agro-écosystème (figure 1.10).

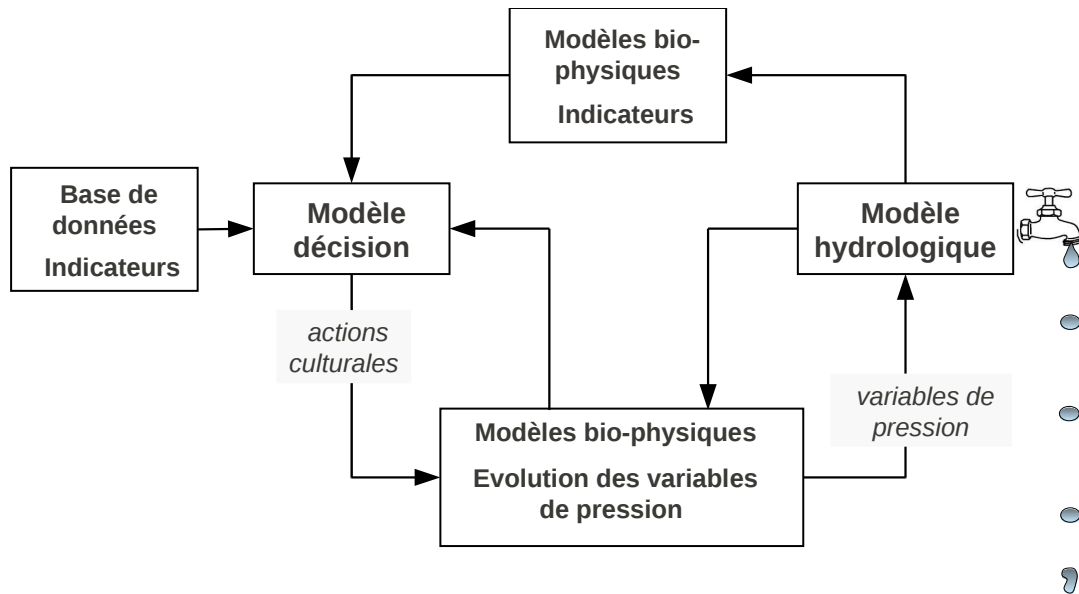


FIGURE 1.10 – Schéma du modèle conceptuel

Deux types de processus participent à la variabilité spatio-temporelle de ces variables de pression : les processus de gestion technique, comme on vient de l'évoquer, mais également des processus biophysiques. Les actions culturelles des viticulteurs, discrètes dans le temps et sous dépendance de leurs règles de décision pour l'action, modifient les deux variables : la concentration en matières actives au sol lors de la pulvérisation de pesticides et l'infiltrabilité lors d'opérations d'entretien du sol qui modifient les états de surface. Les variables de pression modifiées par les actions culturelles évoluent ensuite de manière continue sous le contrôle de processus biophysiques : sous l'effet du climat et du temps, la concentration en matières actives peut diminuer et l'état de surface évoluer (développement des adventices, d'une croûte de surface) et ainsi modifier l'infiltrabilité.

1.2.2.1 Les processus décisionnels

Les actions de travail du sol et d'application de pesticides sont liées aux pratiques d'entretien du sol et de protection phytosanitaire mises en oeuvre dans les exploitations. On présente d'abord les différentes stratégies présentes dans la zone d'étude pour ces deux ensembles de travaux puis on présente l'itinéraire technique des exploitations pour exposer le déroulé des actions au cours d'un cycle cultural. Finalement, on donne quelques éléments sur les processus qui conduisent ces actions pour conclure sur les choix réalisés pour le modèle conceptuel.

Les différents types d'entretien du sol dans la zone d'étude L'entretien du sol a pour principal objectif la réalisation de conditions favorables au développement de la vigne en agissant sur :

- les propriétés physico-chimiques et le régime hydrique du sol ;
- le développement des mauvaises herbes durant la période végétative afin, principalement, de limiter la concurrence pour l'alimentation hydrique et minérale mais également de contenir les risques de gelées de printemps et les microclimats favorables aux maladies.

Différentes techniques sont à la disposition du viticulteur pour l'entretien de sa parcelle : le désherbage chimique, l'entretien mécanique ou travail du sol et l'enherbement. Le rang et l'inter-rang étant traités séparément, il peut utiliser une ou plusieurs techniques sur la même parcelle sachant que les modalités peuvent même alterner sur les inter-rangs.



FIGURE 1.11 – Trois modalités d'entretien du sol (de gauche à droite : travail du sol, enherbement, désherbage chimique)

Le désherbage chimique consiste à appliquer des herbicides de pré et/ou post-levée pour détruire les adventices. Il est donc considéré comme un non travail, l'état de surface n'est modifié que par la présence de végétation entre deux applications d'herbicides. Le sol est donc le plus souvent nu et induit de forts ruissellements et de l'érosion (figure 1.11).

L'entretien mécanique se fait par labour ou plus couramment, par un travail plus superficiel soit avec des outils à dents qui forment des petits sillons, soit avec des outils à axe horizontal rotatif (houes rotatives) (figure 1.11). Le travail du sol permet donc d'ouvrir la surface du sol en améliorant la rugosité aléatoire par la formation de mottes et la porosité. La capacité d'infiltration est donc améliorée mais diminue avec les pluies postérieures au travail du sol.

L'enherbement maintient un couvert végétal sur le sol (figure 1.11), il peut être naturel ou semé. Permanent, il est entretenu par tontes. Temporaire, il est alors détruit par désherbage chimique ou travail du sol et on l'appelle enherbement maîtrisé (ou ENM : Enherbement Naturel Maîtrisé s'il est naturel). Cette modalité, en couvrant le sol, permet de réduire fortement les risques de ruissellement et d'érosion sur les parcelles.

Dans la zone d'étude : la vallée de la Peyne, la modalité actuellement la plus utilisée est le travail du sol sur l'inter-rang associé au désherbage chimique sur le rang (Biarnès, 2006). Dans certaines communes, du fait essentiellement des risques de non traficabilité de certains sols après un événement pluvieux, l'alternance des inter-rangs traités par travail du sol et désherbage chimique ou enherbement est préférée, le désherbage chimique sur le rang y étant toujours associé. Le désherbage chimique en plein (rangs et inter-rangs) n'est donc plus majoritaire mais est encore bien présent (environ un cinquième des parcelles étudiées l'utilise) surtout sur les vignes en gobelet. L'enherbement n'est pas répandu du fait de la forte concurrence hydrique qu'il induit dans des régions à déficit hydrique naturel pour la vigne (indice de sécheresse).

Les différentes stratégies de protection phytosanitaire La stratégie de protection phytosanitaire caractérise le mode de raisonnement de la protection mise en oeuvre. Dans la zone d'étude, on distingue plusieurs types de stratégies selon un gradient qui va des stratégies conventionnelles qui en viticulture mettent en oeuvre des stratégies essentiellement préventives,

aux stratégies raisonnées qui se définissent comme une méthode de lutte dans laquelle l'usage des moyens chimiques pour lutter contre les bio-agresseurs est limité aux cas de dépassement du seuil de nuisibilité (Barbier et al., 2009). La conception et la mise en oeuvre d'une protection intégrée des cultures s'appuie ainsi sur deux grands principes (i) une utilisation raisonnée d'intrants chimiques c'est à dire un usage qui soit justifié par des nécessités provenant d'une observation judicieuse de l'état et de la dynamique du patho-système et des conditions ambiantes (ii) une anticipation par le choix de modalités de conduite des parcelles qui limitent la sensibilité du végétal et l'agressivité des ravageurs et maladies.

Dans la zone d'étude, les deux bio-agresseurs principaux sont l'oïdium et le mildiou. On présente les stratégies de lutte contre ces deux maladies.

En contexte méditerranéen, l'oïdium est la maladie fongique la plus problématique pour la vigne. Les paramètres climatiques qui conditionnent le cycle de développement du champignon ne sont pas complètement connus, il est donc difficile de prévoir son développement dans le vignoble. Pour ces raisons, la stratégie adoptée par les viticulteurs est essentiellement une stratégie de protection de type préventive.

Cette stratégie se décline différemment chez les viticulteurs selon qu'ils constituent ou non différents lots de parcelles pour lesquels le démarrage de la protection est plus ou moins précoce. En effet, on considère que le risque de développement de la maladie est différent en fonction de la sensibilité de la plante et en fonction du développement de la végétation, ces deux paramètres variant en fonction de la variété et du contexte parcellaire. Il est donc possible d'étaler le démarrage de la protection au niveau de l'exploitation en fonction de la gamme de sensibilité et de précocité existante, du risque accepté et de la structure d'exploitation (surface, matériel, main d'œuvre).

La stratégie de lutte étant de type préventif, les traitements sont réalisés de manière répétitive selon une cadence de traitement des vignes généralement liée à la rémanence des fongicides.

La fin de la protection est au plus tard à « la date de récolte – le DAR² du produit utilisé ». Cependant il existe une résistance ontogénique de la plante, c'est-à-dire que les tissus sont moins sensibles au champignon en vieillissant. Les viticulteurs peuvent donc arrêter la protection avant la date maximale en fonction de leur conception du stade phénologique à partir duquel la plante ne risque plus de développer la maladie ou que des traitements supplémentaires ne diminueront pas les conséquences d'une éventuelle contamination.

Finalement, différentes solutions sont également mises en oeuvre dans le cas d'observations de symptômes (traitements curatifs) : soit la cadence de traitement est augmentée, soit des traitements intercalaires sont réalisés.

Le mildiou de la vigne est une maladie fongique dont les conditions et les cycles de développement sont bien connus. Il est donc possible en se basant sur les prévisions météo et sur des observations et/ou des bulletins d'avertissements de limiter dans le temps la protection aux seules périodes où le développement de la maladie est possible (on définit le risque



FIGURE 1.12 – Photo de traitement phytosanitaire dans les vignes

en terme de pression plus ou moins importante de la maladie). La protection est là encore préventive mais son déclenchement peut être basé sur des indicateurs du milieu là où celui de la protection anti-oïdium dépend uniquement de la plante et de son développement. Les stratégies de protection contre le mildiou varient donc de stratégie de traitement préventif, systématique et répétitif (selon une cadence définie par les durées de rémanence des fongicides) à des stratégies de traitement semi-curatives : les traitements ne sont mis en oeuvre que si la maladie se déclare dans la zone (généralement la zone correspond aux territoires des communes) et ils sont alors poursuivis tant que la maladie est présente ou tant que la vigne n'a pas atteint un stade phénologique qui la rend moins sensible à la maladie.

La stratégie de protection anti-mildiou s'appuie fortement sur la stratégie de protection anti-oïdium (démarrage et traitements systématiques calés sur des traitements anti-oïdium). Ceci est dû à la position centrale de la lutte anti-oïdium qui, de par l'importance de la maladie pour la zone et la nécessité de traitements réguliers dès l'apparition de la végétation jusqu'à la récolte, rythme l'ensemble de la protection phytosanitaire.

Les itinéraires techniques dans la zone d'étude La conduite technique d'un vignoble se réalise à l'échelle d'une année selon le cycle de la vigne (figure 1.2). Dans la zone d'étude, après les vendanges, aux mois d'octobre et novembre, un travail du sol automnal peut être réalisé pour décompacter le sol après le passage des machines à vendanger. Ce travail du sol permet également de limiter le développement hivernal de l'herbe dans les inter-rangs entretenus par travail du sol pour faciliter la reprise de celui-ci au printemps. Certains viticulteurs réalisent également la fertilisation à ce moment.

À partir de mi-novembre, quand les feuilles tombent, la taille commence. En fonction de la surface à tailler, elle se termine entre février et avril. Durant l'hiver, ils peuvent également réaliser un travail du sol en fonction des opportunités climatiques, organisationnelles et d'état biophysique des parcelles. En parallèle de la taille ou sur la fin, les viticulteurs broient les sarments mis à terre ou les sortent des parcelles. Un travail du sol de reprise peut ensuite être réalisé pour enfouir les sarments broyés, détruire l'herbe présente et décompacter le sol pour favoriser l'infiltration et les futurs travaux du sol de printemps-été. Certains viticulteurs choisissent cette période pour la fertilisation.

En fin d'hiver et à l'approche du débourrement de la vigne (mars-avril), les viticulteurs réalisent le désherbage chimique. En fonction des parcelles, celui-ci peut concerner les rangs uniquement jusqu'à l'ensemble de la surface. Ce désherbage permet de détruire l'herbe présente (avec des herbicides de post-levée) voire d'empêcher son développement pendant quelques mois (avec des herbicides de pré-levée). Il vient suppléer (ou parfois compléter) le travail du sol. C'est également l'époque des plantations.

La période printemps-été (à partir de la mi-avril jusqu'à juillet-août) est ensuite rythmée par la réalisation des traitements phytosanitaires pour protéger la vigne des bio-agresseurs, principalement l'oïdium et le mildiou. Un ou plusieurs travaux du sol sont réalisés pour détruire l'herbe et limiter la concurrence hydrique avec la vigne. Certains viticulteurs peuvent, dans cet objectif, également renouveler le désherbage chimique de certaines surfaces. À cette époque, il y a également du travail manuel : l'épamprage pour supprimer les bourgeons surnuméraires sur les pieds des vignes et le palissage pour contenir la végétation grâce à des fils et favoriser son exposition. L'épamprage peut aussi être réalisé chimiquement avec des herbicides, soit à la machine à dos, soit en employant un pulvérisateur tracté. L'écimage et le rognage viennent compléter cette gestion de la végétation en supprimant le surplus. Finalement, le cycle cultural se termine avec les vendanges qui s'étendent de mi-août à fin septembre.

Les processus de gestion technique qui définissent les actions Les actions culturelles de travail du sol et de pulvérisation de pesticides s'étalent donc tout au long du cycle. Elles sont sous contrôle de différentes décisions que prennent les viticulteurs pour gérer techniquement leur exploitation, notamment leurs choix stratégiques d'entretien du sol et de protection phytosanitaire mais également les décisions qui, au quotidien, définissent les choix tactiques de mise en oeuvre des stratégies en s'adaptant à différents facteurs incontrôlables comme le climat. L'agriculteur peut être assimilé à un entrepreneur qui établit des plans prenant en compte les aléas et les moyens d'y répondre (Papy, 1994 ; Aubry, 2000). Ainsi, le modèle de comportement de l'agriculteur est caractérisé par des objectifs généraux, un programme prévisionnel avec des états-objectifs intermédiaires et un corps de règles d'organisation et d'ajustement aux éventualités. Les processus de gestion technique qui définissent la conduite technique réalisée au sein d'une exploitation et donc les actions culturelles peuvent donc être représentés par des ensembles de règles et de variables décisionnelles. On s'appuiera donc sur une telle représentation des processus pour modéliser les actions culturelles, c'est ce qui correspond au *modèle de décision* sur le schéma du modèle conceptuel. Puisqu'on modélise le fonctionnement d'un bassin versant, le modèle de décision doit permettre de simuler en parallèle les processus de gestion technique de l'ensemble des exploitations de ce territoire.

Les règles de décisions des viticulteurs s'appuient sur des indicateurs variés. Certains indicateurs sont organisationnels (e.g. un travail n'est réalisé que si un autre est terminé) et dépendent donc de processus représentés en interne du modèle de décision. Mais d'autres indicateurs sont biophysiques. On a vu par exemple que les traitements phytosanitaires peuvent dépendre de l'état d'infestation et du niveau de développement végétatif de la vigne (stade phénologique), le travail du sol peut dépendre de la présence d'herbe, etc. Le modèle conceptuel comprend donc également des *bases de données et des modèles bio-physiques pour la représentation de ces indicateurs*.

1.2.2.2 Les processus biophysiques

Après modification discrète dans le temps par les actions culturelles, les variables de pression évoluent de manière continue sous l'effet de processus biophysiques. On présente les processus qui font évoluer les variables et qui sont représentés sur le schéma du modèle conceptuel par le bloc : *Modèles bio-physiques pour l'évolution des variables de pression*.

La dynamique de l'infiltrabilité de la surface du sol L'infiltration de l'eau dans le sol est liée à de nombreux facteurs dont les plus importants sont la présence d'une croûte et la structure des horizons de surface (Bradford et al., 1987 ; Valentin et Bresson, 1992), la rugosité superficielle (Chevallier et al., 1990), la teneur en cailloux (Poesen et al., 1990), l'activité biologique et la macroporosité qui en résulte (Albergel, 1987 ; Wilson et Luxmoore, 1988 ; Casenave et Valentin, 1989 ; Valentin et Bresson, 1992), la porosité du sol et la proportion de vide structural (Boiffin et al., 1988 et Mwendera and Feyen, 1994), l'état d'humectation initial du sol (Casenave et Valentin, 1989), le type et la densité de la couverture végétale (Dunne et Dietrich, 1980 ; Casenave et Valentin, 1989 et Dunne et al., 1991) et la pente (Poesen, 1984). Parmi ces facteurs, certains sont variables dans le temps et contrôlent la dynamique de l'infiltrabilité. C'est le cas de la croûte de surface du sol, de la rugosité superficielle et de la densité de couverture végétale.

En effet, après un travail du sol, l'état de surface est fragmentaire, poreux et meuble, la rugosité est importante ; l'infiltrabilité est maximale, de 30 à 60 mm/h par exemple dans une étude réalisée par Boiffin et al. (1986) dans le pays de Caux (Normandie). Puis la pluie détruit

les agrégats par désagrégation mécanique, éclatement, microfissuration ou dispersion physico-chimique, produisant des particules qui viennent colmater les pores. La rugosité est diminuée (Boiffin et Sebillotte, 1976 ; Dexter, 1977 ; Boiffin, 1984 ; Martin, 1999). Une croûte structurale se forme, réduisant l'infiltrabilité à moins de 6 mm/h (Boiffin et al., 1986).

De plus, en fonction de la pousse des cultures ou des adventices, des saisons et des travaux agricoles, les sols cultivés sont plus ou moins couverts par la végétation ou par une litière, or la couverture du sol, qu'elle provienne d'une strate herbacée ou d'une litière, améliore considérablement l'infiltration (Albergel et al., 1985). En effet, la couverture inhibe partiellement la formation des croûtes de battance (Ouvry, 1987) en réduisant l'énergie cinétique des gouttes de pluie (Brandt et Thornes, 1987) et donc «l'effet splash». Par l'action des racines, l'augmentation de l'activité de la microflore et de la matière organique (Monnier, 1965), la végétation augmente la structuration du sol, elle crée et maintient un relief qui divise, ralentit et dirige les lames d'eau ruisselantes vers des lieux de réinfiltrations préférentiels (de Ploey, 1984).

La dynamique de la concentration en matières actives au sol La concentration en pesticides d'un lieu donné évolue sous l'effet de phénomènes de dégradation par dissipation et sous l'effet de processus de transfert dans l'eau de ruissellement.

Des suivis de teneurs en herbicides (diuron et simazine) dans l'horizon 0-15 cm en parcelles viticoles méditerranéennes ont montré que la dissipation est, dans un premier temps, essentiellement de la dégradation biologique rapide puis, dans un second temps, elle est ralentie du fait de l'accessibilité régressive des herbicides aux microorganismes pouvant les dégrader par les phénomènes de rétention et de diffusion (Louchart, 1999). La teneur en eau semble être le facteur principal contrôlant l'activité microbienne de dégradation des herbicides (Louchart et Voltz, 2007), la température étant un facteur secondaire mais amplificateur. Les périodes de sécheresse ralentissent ou empêchent la dégradation des herbicides. L'humidité plus importante semble aboutir à une dissipation plus rapide .

Les pesticides présents dans la couche superficielle du sol peuvent également être transférés dans l'eau de ruissellement sous forme dissoute, particulaire ou adsorbée sur des particules de sol en suspension. La mobilisation de ces pesticides par l'eau de ruissellement consiste en 4 mécanismes parallèles, décrits par Bailey et al. (1974) :

1. diffusion et convection des pesticides dissous de la solution des pores du sol vers la lame d'eau en mouvement, sous l'impact des gouttes de pluie ;
2. désorption d'une partie des pesticides adsorbés³ sur les agrégats du sol dans la solution du sol ou directement dans la lame d'eau, du fait de la modification des concentrations dans la solution du sol sous l'effet de l'infiltration et du ruissellement ;
3. dissolution des pesticides à l'état solide dans la solution des pores du sol ou dans l'eau de ruissellement ;
4. décapage et mise en suspension des pesticides à l'état solide ou des particules de sol sur lesquelles les pesticides sont adsorbés (en relation avec les processus d'érosion).

A partir de leur lieu de mobilisation, les pesticides peuvent alors être transportés par l'eau de ruissellement jusqu'à l'exutoire du bassin versant considéré. En général, du fait de la complexité des écoulements à surface libre et de processus physico-chimiques propres au transport d'eau et de particules (sédiments, débris de végétaux, etc.), les concentrations en pesticides dans l'eau

3. L'adsorption peut se définir comme l'accumulation ou la fixation de molécules au niveau de l'interface sol-eau (ou sol-air), la désorption est le processus inverse.

de ruissellement diminuent au cours du transport (Wauchope, 1978 ; Wauchope et Leonard, 1980a,b ; Ng et al.,1995) par :

- dilution par les apports d'eau peu ou pas concentrée en pesticides ;
- piégeage, adsorption et absorption par les plantes, les dispositifs enherbés ou le sol ;
- pertes en eau par infiltration au cours du transport.

En conclusion, en un lieu donné, la concentration en matières actives au sol diminue au cours du temps sous l'effet de la dissipation et des transferts par ruissellement.

1.2.2.3 Synthèse

Le modèle conceptuel a été construit autour des processus principaux qui définissent la pollution de l'eau par les pesticides en zone viticole languedocienne. Il comprend :

- *un modèle hydrologique* pour représenter principalement le processus de ruissellement polluant dépendant de l'infiltrabilité et de la concentration en matières actives au sol ;
- *un modèle de décision* pour représenter les processus de gestion technique qui définissent les actions culturales de travail du sol et d'application de pesticides accompagné de modèles et de bases de données pour les indicateurs biophysiques pour la décision ;
- *des modèles bio-physiques* pour représenter l'évolution de l'infiltrabilité et de la concentration en pesticides entre deux modifications par les actions anthropiques.

On constate sur le schéma conceptuel que les processus décisionnels et hydrologiques liés par les variables de pression interagissent également directement ou indirectement via d'autres variables de couplage. On peut voir que certains indicateurs de la décision sont sous contrôle de processus hydrologiques (travaillabilité via la teneur en eau du sol) ou de processus biophysiques qui font évoluer l'infiltrabilité après les actions culturales (couverture herbacée). Par ailleurs, il existe des rétro-actions des processus hydrologiques sur les processus biophysiques d'évolution des variables de pression (par exemple, le lessivage des pesticides par ruissellement fait baisser la concentration en matières actives au sol).

A partir de la définition de deux variables de couplage entre les processus décisionnels et les processus hydrologiques et donc d'une relation de succession, on aboutit donc à un modèle conceptuel qui propose d'intégrer la représentation de processus biophysique et des rétro-actions entre les différents processus nécessaires à l'évaluation des impacts des pratiques dans les agro-écosystèmes étudiés.

1.2.3 Du modèle conceptuel au modèle informatique

A partir du modèle conceptuel, différents modèles thématiques correspondant aux différents processus, ont été développés puis ils ont été couplés. Les travaux de modélisation sont présentés aux parties I et II pour le modèle décisionnel et les modèles biophysiques. Un modèle hydrologique existant a été mis en oeuvre.

1.2.3.1 Le modèle hydrologique

Le modèle hydrologique doit prendre en charge la modélisation du ruissellement mais comme il doit informer de la teneur en eau du sol pour certaines décisions des viticulteurs, il doit également réaliser un bilan hydrique. Il doit proposer une paramétrisation dynamique et distribuée de certaines de ses variables d'entrée modifiées par les actions culturales. Dans la littérature, plusieurs modèles hydrologiques distribués, appartenant à des écoles hydrologiques

diverses, ont été développés pour simuler les mécanismes complexes de cheminement de l'eau sur un bassin versant lors d'évènements de crues : e.g. TOPMODEL (Beven et Kirkby, 1979), Système Hydrologique Européen (SHE) (Abbott et al., 1986a, b ; Bathurst et O'Connell, 1992), SWATC (Morel-Seytoux et Alhassoun, 1987), KINEROS (Woolhiser et al., 1990), THALES (Grayson et al., 1992), TOPOG (Vertessy et al., 1993), Limburg Soil Erosion Model (LISEM) (De Roo et Offermans, 1995). Ces modèles diffèrent par le domaine d'application, la structure, les paramètres d'entrées et la représentation de l'espace et du réseau hydrographique. Cependant la majorité d'entre eux ne prennent pas ou très partiellement en compte les singularités du milieu agricole, notamment celles liées aux pratiques et aménagements agricoles. Pour réaliser le travail de thèse, le modèle MHYDAS (Modélisation Hydrologique Distribuée des AgroSystèmes ; Moussa et al., 2002) qui a été développé au sein de l'UMR LISAH, a été utilisé. En effet sa structure a été conçue pour permettre la représentation des géométries complexes existantes en milieu cultivé. Il comporte un module de découpage de l'espace en unités hydrologiques où les frontières correspondent aux discontinuités du milieu ; un module de simulation des mécanismes hydrologiques lors des évènements de crues (infiltration, ruissellement sur les versants, écoulement dans le réseau hydrographique, écoulement de nappe et échanges surface-souterrain) et un module de transfert des pesticides. Le modèle est développé sous l'environnement OpenFLUID présenté au chapitre 9.

1.2.3.2 Le modèle décisionnel

Le modèle décisionnel représente les processus de gestion technique qui conduisent aux actions culturales de travail du sol et d'application de pesticides pour chaque exploitation du territoire étudié. Chaque exploitation ayant des stratégies différentes, les processus de gestion technique ne conduisent pas aux mêmes déroulés d'actions culturales. De plus, les exploitations sont structurées différemment et sont donc soumises à des contraintes différentes. Pour construire le modèle de décision, on a donc procédé préalablement à une analyse des processus de gestion technique (*chapitre 2*) par enquêtes de viticulteurs situés sur le bassin versant de la Peyne (75 km²). Ainsi les exploitations étaient variées en terme de conduites techniques, de contraintes sur les ressources et de contraintes parcellaires (dispersion des parcelles, types de sols, modes de conduite des vignes, ...). Cette analyse a permis de déterminer quels processus devait représenter le modèle, et avec quelle variabilité entre les exploitations, pour proposer des répartitions spatio-temporelles réalistes des actions culturales à l'échelle d'un bassin versant. Un modèle déterministe a ensuite été développé (*chapitre 3*) sous l'environnement DIESE (Martin-Clouaire et Rellier, 2009) avec l'idée de fournir une structure adaptée à une modélisation du fonctionnement de plusieurs exploitations simultanément et qui offre de la flexibilité pour tester différents systèmes de culture viticoles.

1.2.3.3 Les modèles biophysiques

Deux types de processus bio-physiques sont liés aux variables de pression (un processus peut appartenir aux deux types) :

1. ceux qui contrôlent l'évolution continue des variables de pression après leur modification par actions anthropiques discrètes ;
2. ceux qui conditionnent la répartition spatio-temporelle des actions et donc des modifications discrètes des variables de pression en définissant des indicateurs pour les décisions.

La même démarche a été suivie pour l'ensemble des modélisations. On a tout d'abord procédé à un inventaire des modèles existants. S'il en existait, on a évalué leur adaptation à notre cas

d'étude, sinon on a cherché à en développer. Les modèles les plus simples ont été préférés, car les modèles biophysiques nécessitent une paramétrisation adaptée à la zone d'étude. On a donc souhaité limiter le nombre de variables à paramétrer pour favoriser la « transportabilité » du modèle final. On n'a donc pas forcément favorisé les modèles mécanistes pour les processus biophysiques mais, dans le cadre d'une modélisation intégrée, nous avons tout de même favorisé le choix de modèles à bases physiques.

L'évolution de la concentration en matières actives au sol L'ensemble des processus bio-physiques qui conditionnent la dissipation et le transfert des polluants sont représentés dans le modèle MHYDAS. Il existe donc des modèles adaptés à la problématique et à la zone d'étude.

La dynamique de l'infiltrabilité Deux processus majeurs qui font évoluer l'infiltrabilité dans le cadre de la problématique ont été identifiés : l'évolution de la surface du sol après un travail du sol sous l'effet de la pluie qui diminue l'infiltrabilité et le développement d'une couverture herbacée (croissance de plantes adventices) qui augmente l'infiltrabilité.

Pour prédire l'évolution temporelle de l'infiltrabilité du sol entre deux actions culturales sur le sol certains auteurs (e.g. Ahuja et al., 1984 et 1989 ; Timlin et al., 1999 ; Chahinian et al., 2006) représentent l'évolution de la conductivité hydraulique à saturation. Cette variable correspond à la valeur minimale et constante d'infiltration quand le sol est à saturation. Dans leur revue de littérature, Green et al. (2003) montrent que les équations d'évolution de la conductivité proposées dans la littérature concernent l'évolution après un travail du sol. Il n'existent donc pas à notre connaissance, de telles équations pour représenter également l'évolution de la conductivité en fonction de l'évolution de la couverture herbacée.

Une autre approche de représentation de la dynamique de l'infiltrabilité utilise le Curve Number (USDA, 1986). Ce paramètre empirique est utilisé en hydrologie pour prédire le ruissellement ou l'infiltration en fonction de la hauteur de pluie pour différents types de sol et d'état de surface du sol. Des courbes d'évolution du Curve Number pour des sols travaillés permettent donc de représenter les évolutions d'infiltrabilité en fonction du cumul de pluie depuis le dernier travail du sol. Mais, concernant la couverture herbacée du sol, qu'elle soit liée aux adventices ou à la culture, les courbes proposées n'intègrent pas la variation temporelle de la couverture : les évolutions sont données pour des valeurs de couverture fixées.

Par conséquent, aucune de ces approches ne nous permet de représenter la dynamique de l'infiltrabilité en fonction du travail du sol et de l'évolution de la couverture herbacée. Dans le cadre de la thèse, une troisième approche de modélisation de la dynamique de l'infiltrabilité a donc été mise en oeuvre : nous avons représenté la dynamique des états de surface du sol pour en déduire celle de l'infiltrabilité. En effet, développer des équations d'évolution de la conductivité hydraulique à saturation en fonction de l'évolution de la couverture herbacée nécessite des mesures de terrain importantes, qu'il n'était pas possible de réaliser. Quant à l'approche par le Curve Number, elle ne correspondait pas à l'approche globale de modélisation mise en oeuvre : le Curve Number a pour objectif de déterminer de manière empirique la part de ruissellement, or nous avons fait précédemment le choix de représenter les processus de ruissellement de manière mécaniste par un modèle hydrologique. L'objectif de cette modélisation de l'infiltrabilité est donc de fournir la valeur de la variable au modèle mécaniste.

Le concept d'état de surface (EDS) (Ludwig, 1992 ; Martin, 1997) désigne l'association entre une organisation structurale de surface (10-15 premiers cm) et les éléments se trouvant

à la surface du sol minéral. Ces éléments pouvant soit être originaires du sol minéral sous-jacent à cette surface (ex : cailloux), soit être étrangers à ce substrat et à sa surface, il s'agit alors d'objets organiques introduits de manière naturelle (ex : herbe) ou anthropiques (ex : sarments).

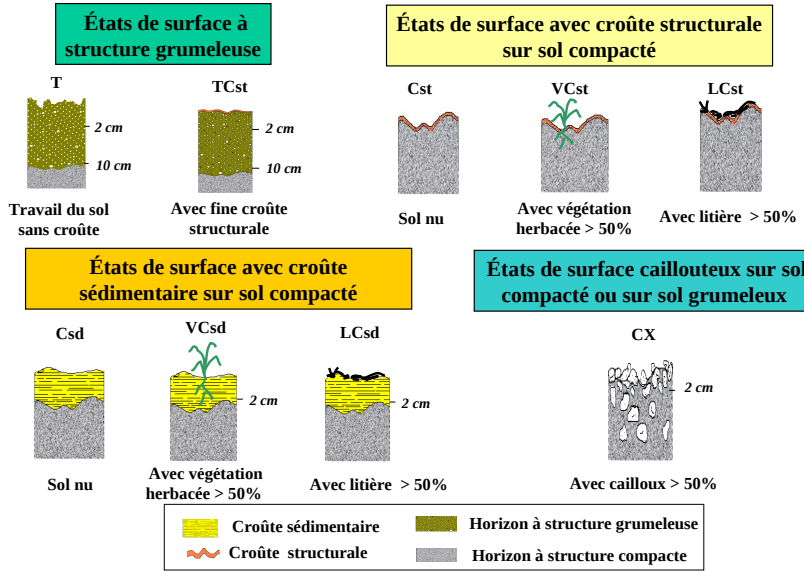


FIGURE 1.13 – Typologie des états de surface réalisée par Andrieux et al. (2001) en zone viticole méditerranéenne

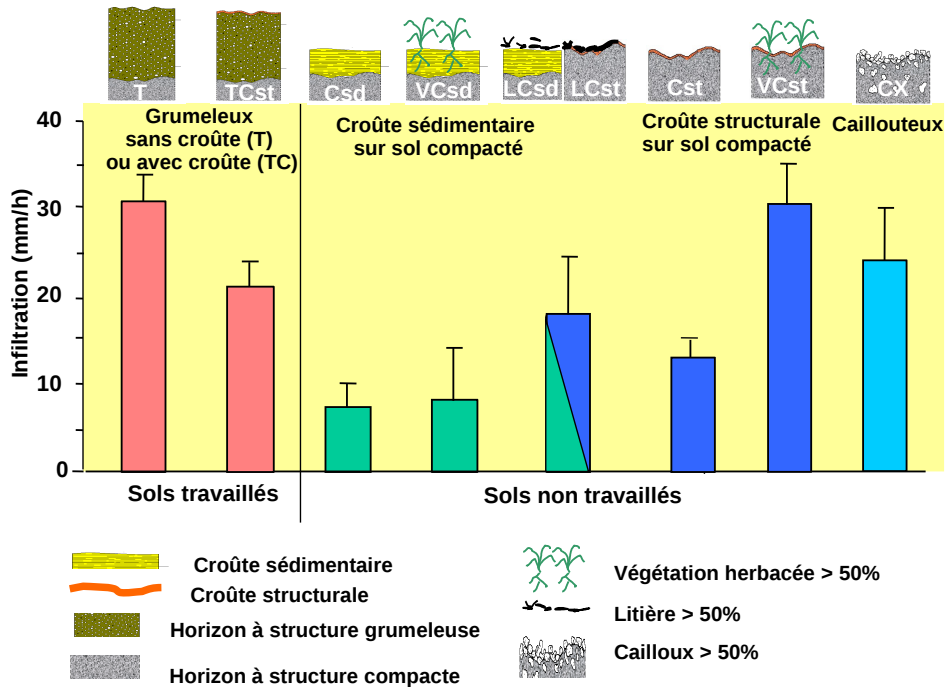


FIGURE 1.14 – Infiltrabilité de différents types d'états de surface

Pour la zone d'étude, une typologie a été établie par Andrieux et al. (2001) sur le bassin versant de Roujan. Elle définit 9 états de surface (figure 1.13). Ces auteurs ont pu définir des classes d'infiltrabilité différentes pour chaque état de surface caractérisé (figure 1.14) en les soumettant à une pluie simulée à l'échelle du m², pluie possédant une intensité stabilisée et choisie suivant les caractéristiques climatiques méditerranéennes.

La variance d'infiltrabilité entre les EDS étant plus élevée que la variance pour un même EDS, cette expérience justifie la distinction établie par la typologie. Par ailleurs, en fonction des actions d'entretien du sol mises en oeuvre sur une parcelle, on peut observer différentes trajectoires d'évolution des états de surface (Paré, 2007). On a donc cherché à modéliser l'évolution des EDS entre les actions culturales. On présente au *chapitre 4*, un modèle d'évolution des états de surface sur sols nus et travaillés basés sur une régression logistique. Les *chapitres 5 et 6* présentent la modélisation du développement de la couverture herbacée. Finalement le *chapitre 7* montre comment à partir de ces deux modèles, on représente la dynamique de l'infiltrabilité.

Les processus qui modifient la répartition spatio-temporelle des actions culturales

Ces processus définissent des indicateurs pour les prises de décisions des viticulteurs concernant la réalisation d'opérations culturales. Pour certains indicateurs, on s'est appuyé sur des bases de données. C'est le cas pour les indicateurs climatiques ainsi que pour les états d'infestations et les stades phénologiques de la vigne utilisés pour les décisions concernant les traitements phytosanitaires.

D'autres indicateurs ont été représentés par modélisation. C'est le cas de la couverture herbacée issue de la modélisation présentée au *chapitre 6* et qui sert également à modéliser la dynamique de l'infiltrabilité. Un autre indicateur est défini par modélisation : la possibilité de travailler le sol (travaillabilité) ou de circuler dans les parcelles avec des engins agricoles (traficabilité). Cet indicateur repose sur la teneur en eau du sol calculée par le modèle hydrologique. On présente au *chapitre 8*, en l'illustrant avec la question de la travaillabilité, la double question de la modélisation des indicateurs pour la décision : Comment modéliser les variables biophysiques ? Comment utiliser les valeurs des variables en tant qu'indicateur pour la décision ?

1.2.3.4 Le couplage des modèles

Une fois les modèles unitaires développés, on a procédé à leur couplage au sein de la plateforme de modélisation OpenFLUID (*chapitre 9*). Le cahier des charges du couplage a reposé essentiellement sur l'objectif de construire un modèle couplé à échelles multiples suivant les processus. On présente au *chapitre 9* les adaptations réalisées sur le modèle hydrologique pour atteindre cet objectif.

Le *chapitre 10* présente une illustration des sorties du modèle couplé pression-impact. Le modèle a été testé pour trois exploitations qui cultivent des parcelles du bassin versant de Roujan.

1.2.4 La question de l'évaluation et de la validation du modèle

Dans toute démarche de modélisation, la construction du modèle devrait être suivie d'une étape d'évaluation pour valider le modèle produit.

La question de la validation des modèles systémiques intégrés (Integrated Systems Models) demeure une problématique à part entière. Sur cette question, on peut utilement consulter les

revues de littérature effectuées par Nguyen et al. (2007) et Nguyen et de Kok (2007), les trames de validation proposées et testées sur un modèle de gestion des systèmes côtiers développé pour répondre à des problématiques hydrologiques.

Nguyen (2005) a listé cinq facteurs (possiblement en relation) qui entravent la validation des modèles de type ISM :

- le manque de définitions établies sur la validité des modèles, la validation des modèles et les critères de validation des modèles (problème d'ordre philosophique) ;
- la complexité des modèles systémiques intégrés (problème d'ordre méthodologique) ;
- la représentation des comportements humains dans ces modèles (problème d'ordre psychologique) ;
- la rareté et l'absence de données mesurées (problème sur les bases de données) ;
- le niveau élevé d'agrégation (problème de transparence des systèmes).

Il ajoute que l'incertitude est liée à chacun des cinq points mentionnés ci-dessus.

Il propose alors de définir la validation d'un ISM comme : le processus d'établissement de la *sûreté* et de la *complétude* de la structure du modèle associées à la *plausibilité* et la *conformité* du comportement du modèle.

La *sûreté* de la structure signifie que la structure du modèle est basée sur des raisonnements valides et absents de failles logiques.

La *complétude* de la structure signifie que le modèle devrait inclure tous les éléments pertinents pour la problématique définie, ce qui concerne les décideurs/ les gestionnaires.

La *plausibilité* du comportement signifie que le comportement du modèle ne devrait pas contredire les lois scientifiques générales et la connaissance établie.

La *conformité* du comportement signifie qu'il y a un accord entre le comportement simulé par le modèle et les observations.

Les grandes lignes de la procédure de validation proposée par Nguyen (2005) sont :

- réaliser une analyse de sensibilité du modèle pour identifier les variables d'entrée, les paramètres et donc les sous-modèles qui influent le plus sur les variables de sorties identifiées comme les variables de gestion pour répondre à la problématique ;
- confronter les résultats de l'analyse de sensibilité aux hypothèses des experts sur le fonctionnement du système pour évaluer la sûreté et la complétude de la structure compte tenu de l'objectif du modèle ;
- collecter des données correspondant aux variables et paramètres des sous-modèles les plus influents ainsi que des données pour les variables de sorties (variables de gestion) ;
- déterminer le type de test et les critères de validation des sous-modèles à évaluer compte tenu de l'objectif du modèle ;
- tester les sous-modèles et parallèlement évaluer la propagation de l'incertitude ;
- évaluer par expertise la plausibilité et la conformité du comportement du modèle compte tenu de son objectif.

Cette procédure de validation n'est jamais une fin en soi, elle permet d'identifier les points faibles du modèle et de procéder à de nouveaux développements qui seront de nouveau testés. Le processus est itératif.

Dans le cadre du travail de thèse, il n'a pas été possible de mettre en oeuvre une démarche complète de validation par manque de temps. On s'est donc concentré sur l'évaluation du travail réalisé pour répondre à la question de recherche : Comment paramétrer dynamiquement, pour un modèle hydrologique, les variables d'état d'un agro-écosystème modifiées par les actions culturales dans le but d'évaluer les impacts hydrologiques des pratiques agricoles à l'échelle de petits bassins versants ? Le modèle a donc été évalué pour une année climatique sur :

- *une des variables d'entrée du modèle hydrologique : l'infiltrabilité du sol.* Ces variables sont celles que l'on prétend représenter dans le travail de thèse, il est donc important de les évaluer. La dynamique temporelle de l'infiltrabilité du sol est évaluée à l'échelle de la parcelle pour différentes conduites techniques par comparaison à des observations de terrains portant sur les états de surface. L'évaluation est réalisée au chapitre 10.
- *les variables de sorties des sous-modèles ou groupements de modèles produits dans le cadre de la thèse.* En effet on pose l'hypothèse que la répartition spatio-temporelle de l'infiltrabilité et de la concentration en matières actives que l'on cherche à représenter est sensible au modèle décisionnel et aux modèles biophysiques (qu'ils fournissent des indicateurs pour le modèle décisionnel ou qu'ils représentent une évolution des variables). On a donc réalisé, quand c'était possible, des validations des sous-modèles biophysiques par comparaison à des données d'observations (chapitre 4). Dans le cas où des données d'observations n'étaient pas disponibles, des contrôles de cohérence par expertise (chapitres 6 et 7) ont été réalisés. Les sorties du modèle décisionnel ont été évaluées (chapitre 10) en situation de couplage de l'ensemble des modèles pour intégrer l'effet des indicateurs. On a réalisé une analyse de sensibilité du modèle selon les conduites techniques en évaluant par expertise les calendriers d'actions culturales produits.

Pour conclure, une discussion générale des sorties du modèle couplé ainsi qu'une présentation des perspectives d'évaluation sont effectuées au chapitre 10.

Bibliographie

- Abbott, M., Bathurst, J., Cunge, J., O'Connell, P., and Rasmussen, J. (1986a). An introduction to the european hydrological system – systeme hydrologique europeen, "SHE", 1 : History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87(1-2) :45–59.
- Abbott, M., Bathurst, J., Cunge, J., O'Connell, P., and Rasmussen, J. (1986b). An introduction to the european hydrological system – systeme hydrologique europeen, "SHE", 2 : Structure of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87(1-2) :61–77.
- Agence_de_l'eau_RMC (1998). Composés phytosanitaires dans les eaux superficielles et souterraines du bassin Rhône-Méditerranée-Corse. campagne 1997. Technical report, Agence de l'eau RMC, Lyon.
- Agence_de_l'eau_RMC (2000). Composés phytosanitaires dans les eaux superficielles et souterraines du bassin Rhône-Méditerranée-Corse. campagne 1999- 2000. Technical report, Agence de l'eau RMC, Lyon.
- Agence_Méditerranéenne_de_l'environnement (2003). Quelles armes pour gérer l'impact de l'environnement sur la santé : pesticide prévenir avant de guérir. *La lettre de l'environnement en Languedoc-Rousillon*, 41 :5–6.
- Ahuja, L., Cassel, D., Bruce, R., and Barnes, B. (1989). Evaluation of spatial-distribution of hydraulic conductivity using effective porosity data. *Soil Science*, 148(6) :404–411.
- Ahuja, L., Naney, J., and Nielsen, D. (1984). Scaling soil-water properties and infiltration modeling. *Soil Science Society of America Journal*, 48(5) :970–973.
- Albergel, J. (1987). *Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso : du m² au km², étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution*. PhD thesis, Université Paris 6.
- Albergel, J., Ribstein, P., and Valentin, C. (1985). L'infiltration : quels facteurs explicatifs? *Journal Hydrologique de l'ORSTOM à Montpellier*, pages 25–48.
- Andrieux, P., Hatier, A., Asseline, J., de Noni, G., and Voltz, M. (2001). Predicting infiltration rates by classifying soil surface features in a mediterranean wine-growing area. In *International symposium on the significance of soil surface characteristics in soil erosion, COST 623 « Soil erosion and global change » workshop*, Strasbourg, France.
- Andrieux, P., Louchart, X., Voltz, M., and Bourgeois, T. (1996). Déterminisme du partage infiltration-ruissellement sur parcelles de vigne en climat méditerranéen. In « 5èmes Journées Nationales de l'Etude des Sols - Sols et transferts de polluants dans les paysages

- », pages 133–135. Walter, C. and C. Cheverry (eds.), Rennes, association française pour l'Etude des sols edition.
- Aubertot, J., Doré, T., Ennaifar, S., Ferré, F., Fourbet, J., and Schneider, O. (2005). Integrated crop management requires to better take into account cropping systems in epidemiological models. In *Proceedings of the 9th International Workshop on Plant Disease Epidemiology*, Landerneau, France.
- Aubry, C. (2000). Une modélisation de la gestion de production dans l'exploitation agricole. *Revue française de gestion*, 129 :32–46.
- Bailey, G. W., Swank, R. R., and Nicholson, H. P. (1974). Predicting pesticide runoff from agricultural land : A conceptual model. *Journal of Environment Quality*, 3(2) :95.
- Barbier, J., Biarnès, A., Arondel, E., and Paré, N. (2009). Stratégies d'entretien du sol et de protection phytosanitaire dans la vallée de la peyne. synthèse des résultats du WP2. rapport final du projet ANR geduque. Technical report, Montpellier, France.
- Bathurst, J. C. and O'Connell, P. E. (1992). Future of distributed modelling : The systeme hydrologique europeen. *Hydrological Processes*, 6(3) :265–277.
- Beven, K. and Kirkby, M. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Science Bulletin*, 24(1) :196–201.
- Biarnès, A. (2006). Diversité des pratiques d'entretien du sol en région viticole. In *Colloque PSDR Recherches*, Montpellier, France.
- Boiffin, J. (1984). *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*. PhD thesis, INA P-G.
- Boiffin, J., Papy, F., and Eimberck, M. (1988). Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. i. — analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. *Agronomie*, 8(8) :663–673.
- Boiffin, J., Papy, F., and Peyre, Y. (1986). *Systèmes de production, systèmes de culture et risques d'érosion dans le Pays de Caux*. Ministère de l'agriculture, Paris, INRA edition.
- Boiffin, J. and Sebillotte, M. (1976). Climat, stabilité structurale et battance. essai d'analyse d'un comportement du sol au champ. *Annales Agronomiques*, 27 :295–325.
- Bonfils, P. (1993). Carte pédologique de la france au 1/100.000, feuille de lodève (notice+carte).
- Bradford, J., Ferris, J., and Remley, P. (1987). Interrill soil erosion processes. i : Effect of surface sealing on infiltration, runoff, and soil splash detachment. *Soil Science Society of America journal*, 51(6) :1566–1571.
- Brandt, C. and Thornes, J. (1987). Erosional energetics. In *Energetics of physical environment*, pages 51–87. Gregoryk, .J. (ed.), Chichester, john wiley and sons ltd edition.
- Casenave, A. and Valentin, C. (1989). *Les états de surface de la zone sahélienne*. Coll. Picardie Jules Verne. Editions de l'ORSTOM edition.

- Chahinian, N., Moussa, R., Andrieux, P., and Voltz, M. (2006). Accounting for temporal variation in soil hydrological properties when simulating surface runoff on tilled plots. *Journal of Hydrology*, 326(1-4) :135–152.
- Champagnol, F. (1984). *Eléments de physiologie de la vigne et de viticulture générale*. F. champagnol Saint-Gely-du-Fesc edition.
- Chevallier, P., Planchon, O., Valentin, C., Fritsch, E., and Janeau, J. (1990). *Structure et fonctionnement hydro pédologique d'un petit bassin-versant de savane humide*. Coll. Etudes et Thèses. Hyperbav orstom edition.
- Clerjeau, M. (2004). Bioagresseurs et protection de la vigne. In *Projet de rédaction sur l'écologie des bio-agresseurs et la protection des cultures dans le cadre de l'expertise scientifique collective sur les pesticides (INRA-CEMAGREF) (2004- 2005)*. Savary S. et Aubertot J.N.
- de Ploey, J. (1984). Hydraulics of runoff and loess loam deposition. *Earth Surface Processes and Landforms*, 9(6) :533–539.
- Dexter, A. (1977). Effect of rainfall on surface micro-relief of tilled soil. *Journal of Terramechanics*, 14(1) :11–22.
- Dunne, T. and Dietrich, W. (1980). Experimental study of horton overland flow on tropical hillslopes : I. soil condition, infiltration and frequency of runoff. *Zeitschrift für Geomorphologie Suppl. Bd.*, 35 :40–59.
- Dunne, T., Zhang, W., and Aubry, B. (1991). Effects of rainfall, vegetation, and microtopography on infiltration and runoff. *Water Resources Research*, 27 :2271–2285.
- Grayson, R., Moore, I., and Mahon, T. M. (1992). Physically based hydrological modelling. 1. a terrain based model for investigative purposes. *Water Resources Research*, 28(10) :2639–2658.
- Green, T., Ahuja, L., and Benjamin, J. (2003). Advances and challenges in predicting agricultural management effects on soil hydraulic properties. *Geoderma*, 116(1-2) :3–27.
- Horton, R. (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle. *American Geophysical Union Transactions*, 14 :446–460.
- Jourdan, B. (1994). Activité du vigneron et conception d'un système d'aide à la décision en agriculture. In *Ergonomie des situations informatisées*. J. Theureau et F. Jeffroy, octares edition.
- Lagacherie, P., Andrieux, P., Biarnes, A., Boizard, H., Coulouma, G., Desassis, N., Bissonnais, Y. L., Monestiez, P., Richard, G., Robbez-Masson, J., and Trambouze, W. (2004). Dégradations physiques des sols de vigne et impacts sur la ressource en eau en milieu méditerranéen viticole. Rapport final programme GESSOL - ministère de l'Ecologie et du développement durable.
- Louchart, X. (1999). *Transfert de pesticides dans les eaux de surface aux échelles de la parcelle et d'un bassin versant viticole. Etude expérimentale et éléments de modélisation*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier.

- Louchart, X. and Voltz, M. (2007). Aging effects on the availability of herbicides to runoff transfer. *Environmental Science & Technology*, 41(4) :1137–1144.
- Ludwig, B. (1992). *L'érosion par ruissellement concentré des terres cultivées du nord du Bassin Parisien : analyse de la variabilité des symptômes d'érosion à l'échelle du bassin versant élémentaire*. PhD thesis, Université Louis Pasteur Strasbourg I.
- Martin, P. (1997). *Pratiques culturales, ruissellement et érosion diffuse sur les plateaux limoneux du Nord-Ouest de l'Europe. Application aux intercultures du Pays de Caux*. PhD thesis, INA P-G.
- Martin, P. (1999). Reducing flood risk from sediment-laden agricultural runoff using intercrop management techniques in northern France. *Soil & Tillage Research*, 52(3-4) :233–245.
- 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.
- Monnier, G. (1965). Relation of compaction and other soil properties to erosion resistance of soils. *Transactions ASAE*, 8 :419–422.
- Morel-Seytoux, H. and Alhassoun, S. (1987). SWATC.H. swiss watershed model for simulation of surface and subsurface flows in stream-aquifer system. Technical report, Department of Civil Engineering, Colorado State University.
- Moussa, R., Voltz, M., and Andrieux, P. (2002). Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood events. *Hydrological Processes*, 16(2).
- Mwendera, E. and Feyen, J. (1994). Effects of tillage and rainfall on soil surface-roughness and properties. *Soil Technology*, 7(1) :93–103.
- Ng, H., Gaynor, J., Tan, C., and Drury, C. (1995). Dissipation and loss of atrazine and metolachlor in surface and subsurface drain water - a case-study. *Water Research*, 29(10) :2309–2317.
- Nguyen, T. (2005). *A methodology for validation of integrated systems models with an application to coastal-zone management in south-west sulawesi*. PhD thesis, Engineering Technology (CTW).
- Nguyen, T. and de Kok, J. (2007). Systematic testing of an integrated systems model for coastal zone management using sensitivity and uncertainty analyses. *Environmental Modelling & Software*, 22(11) :1572–1587.
- Nguyen, T., de Kok, J., and Titus, M. (2007). A new approach to testing an integrated water systems model using qualitative scenarios. *Environmental Modelling & Software*, 22(11) :1557–1571.
- Ouvry, J. (1987). Bilan des travaux. campagne 1986-1987. rapport AREAS. Technical report.
- Papy, F. (1994). Working knowledge concerning technical systems and decision support. In *Rural and farming systems Analysis. European perspectives*, pages 222–235. Dent, J.B., Mc Gregor, M.J.(eds), CAB international edition.

- Paré, N. (2007). Etude de la variabilité et de la dynamique des états de surface des sols viticoles méditerranéens.
- Poesen, J. (1984). The influence of slope angle on infiltration rate and hortonian overland flow volume. *Zeitschrift für Geomorphologie Suppl. Bd.*, 49 :117–131.
- Poesen, J., Ingelmosanchez, F., and Mucher, H. (1990). The hydrological response of soil surfaces to rainfall as affected by cover and position of rock fragments in the top layer. *Earth Surface Processes and Landforms*, 15(7) :653–671.
- Ribolzi, O., Andrieux, P., Valles, V., Bouzigues, R., Bariac, T., and Voltz, M. (2000). Contribution of groundwater and overland flows to storm flow generation in a cultivated mediterranean catchment. quantification by natural chemical tracing. *Journal of Hydrology*, 233(1-4) :241–257.
- Roo, A. D. and Offermans, R. (1995). LISEM : a physically based hydrological and soil erosion model for basin-scale water and sediment management. In *Proceedings of a Boulder Symposium : Modelling and management of sustainable basin-scale water resources system*, page IAHS Publ. N°231.
- Timlin, D., Ahuja, L., Pachepsky, Y., Williams, R., Gimenez, D., and Rawls, W. (1999). Use of Brooks-Corey parameters to improve estimates of saturated conductivity from effective porosity. *Soil Science Society of America Journal*, 63(5) :1086–1092.
- Touzard, J. (1998). Deux décennies de transition viticole en languedoc roussillon : de la production à une viticulture plurielle. *Pôle Sud*, 9 :26–47.
- USDA (1986). Urban hydrology for small watersheds. technical release 55 (TR-55) (Second edition ed.). Technical report, Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division.
- Valentin, C. and Bresson, L. (1992). Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. *Geoderma*, 55(3-4) :225–245.
- Vertessy, R., Hatton, T., O'Shaughnessy, P., and Jayasuriya, M. (1993). Predicting water yield from a mountain ash forest catchment using a terrain analysis based catchment model. *Journal of Hydrology*, 150(2-4) :665–700.
- Voltz, M., Andrieux, P., Bouzigues, R., Moussa, R., Ribolzi, O., Joseph, C., and Trambouze, W. (1996). Main hydrological processes in a farmed catchment of the mediterranean area. In *Ecohydrological processes in small basins*, pages 111–122, Strasbourg. UNESCO.
- Wauchope, R. and Leonard, R. (1980a). Pesticide concentrations in agricultural runoff : available data and approximation formula. In *CREAMS : A Field Scale Model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems*, pages 544–559. Knisel, W.G. (ed.), Washington, D.C., U.S. government printing office, conservation research report n.26 edition edition.
- Wauchope, R. D. (1978). The pesticide content of surface water draining from agricultural Fields—A review1. *Journal of Environment Quality*, 7(4) :459.

- Wauchope, R. D. and Leonard, R. A. (1980b). Maximum pesticide concentrations in agricultural runoff : A semiempirical prediction formula1. *Journal of Environment Quality*, 9(4) :665.
- Wilson, G. V. and Luxmoore, R. J. (1988). Infiltration, macroporosity, and mesoporosity distributions on two forested watersheds. *Soil Science Society of America Journal*, 52(2) :329.
- Woolhiser, D., Smith, R., and Goodrich, D. (1990). A kinematic runoff and erosion manual : Documentation and user manual. Technical report, ARS 77, US Dep. of Agric, Washington DC.

Première partie

Modélisation de la répartition
spatio-temporelle des actions
culturales

On présente dans cette partie l'analyse des processus de gestion technique pour la modélisation puis le modèle décisionnel DHIVINE développé pour représenter les actions culturelles des viticulteurs (partie bleue sur la figure 1.15 présentant le modèle conceptuel).

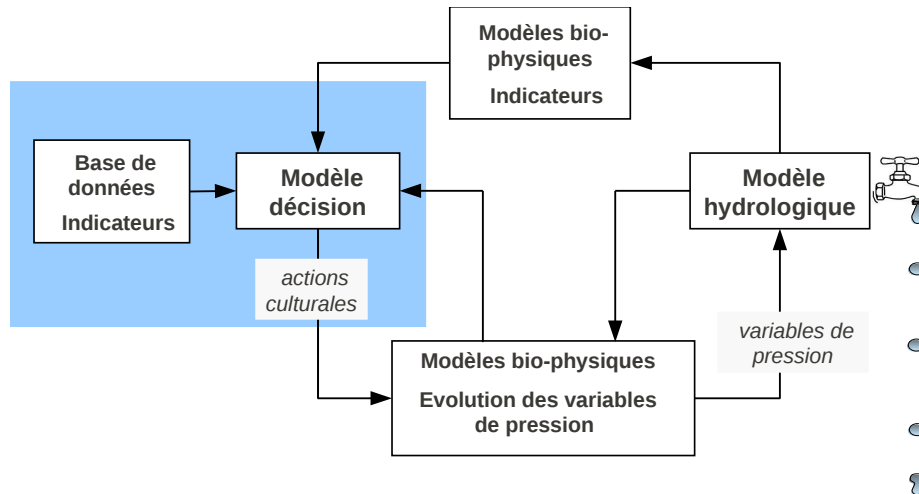


FIGURE 1.15 – La partie du modèle conceptuel traitée dans la partie I

Chapitre 2

Analyse des processus de gestion technique pour la modélisation

Sommaire

2.1	Introduction	65
2.2	Matériel et Méthodes	68
2.2.1	Le plan d'échantillonnage	68
2.2.2	Les données récoltées	68
2.2.3	Le traitement des enquêtes	70
2.3	Résultats et discussion	71
2.3.1	Une grande variabilité de l'objet cultivé	71
2.3.1.1	Le parcellaire	71
2.3.1.2	La distribution des modalités d'entretien du sol sur les parcelles	72
2.3.2	Des niveaux de ressources variables	73
2.3.2.1	La main d'oeuvre	73
2.3.2.2	Le matériel	74
2.3.3	Des modalités de conduites techniques hétérogènes	74
2.3.3.1	Sur les différents travaux du cycle cultural	75
2.3.3.2	Sur l'organisation du travail	80
2.4	Conclusion	81
2.4.1	Un nombre limité d'opérations qui modifie l'infiltrabilité et la concentration en pesticides mais un grand nombre d'actions à modéliser	81
2.4.2	Des conduites techniques variées sur des parcellaires hétérogènes avec de fortes contraintes sur les ressources	81

Chapitre 2

Analyse des processus de gestion technique pour la modélisation

2.1 Introduction

Dans le cadre de notre problématique sur la pollution de l'eau par les pesticides en milieu viticole, on a adopté une démarche de modélisation des agro-écosystèmes dans l'objectif de produire un outil d'évaluation des pratiques culturales à l'échelle de bassin versant. L'infiltrabilité de la surface du sol et la concentration en matières actives au sol ont été identifiés comme deux facteurs déterminants des impacts hydrologiques et fortement dépendants spatio-temporellement des pratiques mises en oeuvre par les agriculteurs, en terme d'entretien du sol et de protection phytosanitaire. En effet, à l'échelle d'un bassin versant cultivé, le motif créé par les parcelles agricoles définit une distribution spatio-temporelle des variables d'état du système que l'on peut assimiler à une mosaïque dynamique animée par les actions culturales¹ réalisées ponctuellement sur chaque pièce de la mosaïque. Il nous faut donc définir pour les opérations qui provoquent une modification de la mosaïque où et quand elles sont réalisées pour chercher à les reproduire dans l'outil d'évaluation des impacts des pratiques.

Le grain spatial de la mosaïque des variables dans l'agro-écosystème est celui de la parcelle agricole. On va donc s'intéresser à représenter l'itinéraire technique, ou tout du moins, une partie des opérations qui constitue l'itinéraire technique de chaque parcelle du bassin versant. On a donc porté l'étude des pratiques au niveau de l'exploitation car c'est bien la conduite technique de l'exploitation qui conditionne in fine les itinéraires techniques réalisés sur les parcelles.

La conduite technique mise en oeuvre dans l'exploitation agricole repose sur des décisions d'ordre stratégique que réalise le chef d'exploitation, qui concernent des temps longs et dépendent principalement de déterminants socio-économiques et de certaines contraintes liées au milieu (Aubry et Michel-Dounias, 2006). On précise que l'on considère ce cadre stratégique fixé et que l'on s'intéresse uniquement aux décisions d'ordre tactique qui conduisent la réalisation des opérations techniques sur les parcelles au cours d'un cycle cultural.

Pour représenter la gestion technique d'une exploitation agricole, il est nécessaire de se situer dans un cadre de formalisation des actes techniques.

1. On notera que le terme action culturale pourra être employé plutôt que le terme d'opération technique pour mettre en valeur ce qui est fait pour réaliser une intention. En effet, l'opération est, elle, caractérisée plutôt par son effet ou son résultat.

Encart 2.1. Un modèle conceptuel de gestion technique d'une sole (Aubry, 2007)

Ce modèle conceptuel comporte trois éléments essentiels : des *variables décisionnelles* (ce sur quoi l'agriculteur doit décider), des *règles de décisions* (comment l'agriculteur aboutit aux valeurs des variables décisionnelles, incluant des indicateurs) et des *unités de gestion* (à quels ensembles temporels et spatiaux l'agriculteur conçoit variables et règles et comment il les applique). Ces éléments du modèle ont été classifiés et une représentation globale proposée.

- les *variables décisionnelles* pour la gestion de la sole de blé culturale comportent des variables portant sur le *positionnement temporel des opérations*, d'autres portant sur les *modalités d'intrants* (choix des variétés, des natures de produits, doses prévues etc.) et enfin sur les *modalités d'organisation de chantiers* (la combinaison de la main d'oeuvre et des équipements nécessaires à la réalisation des opérations).
- Y sont associées des *règles de décision* dont est proposé une classification et une formalisation. Certaines de ces règles sont de type déclaratif, d'autres de type conditionnel [si (indicateur) alors (action)]. Elles portent sur le positionnement temporel à travers les *règles d'enchaînement entre opérations*, de *déclenchement ou de fin* d'une opération ou d'*arbitrage* : ces dernières existent lorsque des intervalles de temps pour des opérations culturales se recoupent (entre parcelles d'une sole ou entre cultures), on a alors concomitance de ces opérations, et que les moyens en main d'oeuvre et en matériel ne permettent pas de les mener toutes simultanément : on a alors une concurrence de travail entre ces opérations. Les règles concernent aussi des modalités d'opérations, à travers leur *constitution* et leur *attribution* aux parcelles de la sole.

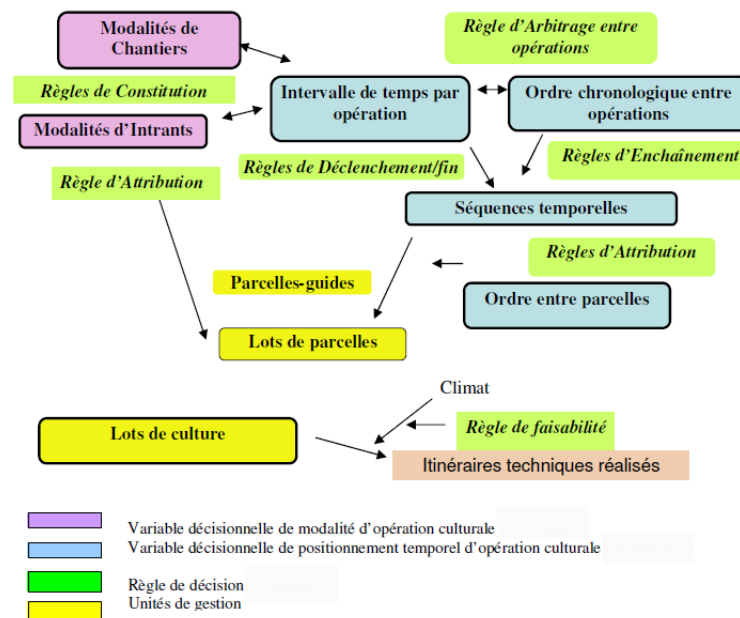


FIGURE 2.1 – Représentation globale de la gestion technique de la sole de blé dans l'exploitation

On constate chez les agriculteurs que les *indicateurs* auxquels ils recourent dans leurs règles de décision sont de nature très variée : dates calendaires-repères, événements liés au peuplement végétal cultivé sur les parcelles (atteinte d'un stade physiologique, observation d'un état d'infestation), avancée du travail sur une autre production, par exemple. Les préoccupations liées à l'organisation globale du travail sur une période (cf ci-dessous) sont des causes très fréquentes de décision sur une culture.

- enfin on identifie des *unités de gestion propres à l'agriculteur* : on constate ainsi que l'agriculteur raisonne rarement parcelle par parcelle, il constitue plutôt des *lots de parcelles* pour attribuer un positionnement temporel et/ou une modalité. D'une opération à l'autre, l'allotement peut varier mais les lots sont toujours constitués sur des critères simples (souvent une proximité géographique, un type de sol, un groupe de variétés etc.) et, sur l'ensemble du cycle cultural on peut identifier des *lots de culture*, rassemblant les parcelles appartenant aux mêmes lots pour les opérations successives.

Le modèle conceptuel de représentation des actions techniques des agriculteurs couramment utilisé par les agronomes est le modèle d'action (Sebillotte et Soler, 1990). Ce modèle intègre les théories de la gestion de l'entreprise ou de l'intelligence artificielle (Papy, 1994 ; Aubry, 2000). Il se base sur la vision de l'agriculteur en tant qu'entrepreneur qui établit des plans prenant en compte les aléas et les moyens d'y répondre. Ainsi, le modèle de comportement de l'agriculteur est caractérisé par des objectifs généraux, un programme prévisionnel avec des états-objectifs intermédiaires et un corps de règles d'organisation et d'ajustement aux éventualités.

A partir de ce concept de modèle d'action, Aubry (1995) a défini dans le cadre d'études d'exploitations en grandes cultures une représentation conceptuelle du raisonnement technique de l'agriculteur qui explicite le plan prévisionnel d'action sous forme de variables décisionnelles et de règles de décision catégorisées (figure 2.1 et encart 2.1). Dans la suite, nous utiliserons le terme de variables et de règles pour l'action plutôt que de variables décisionnelles et de règles de décision, car elles n'ont pas vocation à décrire le raisonnement ou le processus de décision lui même mais bien à prédire le résultat c'est à dire les actions.

Quelques autres approches françaises de la représentation des décisions techniques de l'agriculteur existent, notamment pour le cas de l'élevage (Bellon et al., 1999, Girard et al., 2001) mais peu de modèles ont été identifiés à l'échelle internationale (Aubry et Michel-Dounias, 2006). De plus, la représentation conceptuelle d'Aubry ayant démontré son caractère extrapolable à d'autres cultures et notamment à des cultures pérennes (Bellon et al., 2001, Luneau, 2004), c'est l'approche qui a été utilisée comme grille de lecture des pratiques des viticulteurs.

On considère donc que l'on peut définir, via un ensemble de règles et de variables, un plan d'action du chef d'exploitation à l'échelle du cycle cultural associé à des décisions de mise en oeuvre à un pas de temps très court (la journée). Pour notre cas d'étude qu'est la viticulture languedocienne, on utilise donc cette grille de formalisation des pratiques pour rendre compte de la variabilité des processus de gestion technique du vignoble dans un méso bassin versant (75 km²). Cette analyse se fait nécessairement au regard de la problématique de la pollution de l'eau par les pesticides.

Il ne s'agit pas d'établir une typologie de modèles d'action sous-tendant la gestion technique, mais de caractériser l'organisation anticipée de chacune des opérations culturales impliquée dans la conduite du vignoble et sa variabilité selon les exploitations. Cette caractérisation doit permettre de construire un cadre de modélisation des processus de gestion technique du vignobles, qui permette de rendre compte de différents choix techniques mis en oeuvre sur des vignobles différents, avec de niveaux de ressources en matériels et main d'oeuvre variés. Pour ce faire, la caractérisation de la variabilité de la gestion technique vignoble doit donc s'accompagner d'une caractérisation de la diversité des vignobles, des parcelles de vigne, des ressources en matériel et en main d'oeuvre.

Pour l'étude, on pose l'hypothèse qu'il faut représenter l'ensemble du cycle cultural qui constitue l'unité temporelle significative de l'agriculteur. En viticulture, le cycle dure une année et on considère qu'il s'étend de la fin des vendanges (la récolte se situe généralement à la fin septembre-début octobre) d'une année à la fin des vendanges de l'année suivante. Cette hypothèse est liée à l'étalement des différentes opérations que l'on souhaite représenter sur l'ensemble du cycle cultural (les opérations d'entretiens du sol s'étalent de l'automne au début de l'été).

2.2 Matériel et Méthodes

La démarche adoptée pour l'étude des pratiques est l'enquête en exploitation agricole. Il est nécessaire de signaler que les exploitants rencontrés avaient déjà été soumis à une ou plusieurs enquêtes dans le passé et qu'il existait donc un fond d'informations sur les exploitations et les conduites techniques des exploitations.

2.2.1 Le plan d'échantillonnage

Cinquante-quatre enquêtes ont été réalisées sur le bassin versant de la Peyne. L'échantillonnage a été réalisé spatialement : 5 transects orientés nord-est/sud-ouest et régulièrement espacés ont permis de sélectionner des parcelles puis un tirage au sort de ces parcelles a permis de sélectionner des exploitations à enquêter. Cette sélection par l'espace a été réalisée dans le cadre d'une étude visant à simuler la distribution spatiale des stratégies d'entretien du sol (Biarnès et al., 2009) et pour laquelle un échantillon de 65 exploitations a été constitué. Les 54 exploitations enquêtées au cours de ce travail du thèse sont issues de cet échantillon. Neuf exploitants n'ont pu être rencontrés pour cause de refus ou d'absence de disponibilité.

Ce choix de sélection par l'espace est lié à la question environnementale et au contexte de la zone d'étude. En effet, en 2000, selon les données du dernier recensement général agricole, les petites exploitations (de moins de 5 ha) représentaient 54% du nombre total d'exploitations mais n'occupaient que 8% du territoire. Une sélection d'un échantillon représentatif, basé sur les caractéristiques structurelles d'exploitation, notamment la surface en vigne de l'exploitation, aurait donc conduit à une sur-représentation de ces petites exploitations qui ont a priori un poids plus faible sur les résultats environnementaux à l'échelle du territoire. De plus, cette sélection spatiale assure une bonne répartition spatiale des exploitations enquêtées sur la zone et permet de couvrir les différentes unités pédologiques ainsi que les différentes communes de la vallée. On fait l'hypothèse qu'elle assure une bonne représentation de la diversité des stratégies techniques présente dans la Peyne.

Les enquêtes ont été réalisées durant le printemps 2008 (20) et le printemps 2009 (34). Les enquêtes, de 2h en moyenne, ont été réalisées au domicile de l'exploitant par entretien semi-directif enregistré avec des questions ouvertes.

2.2.2 Les données récoltées

Une première partie des enquêtes s'est attachée à poser le cadre de l'exploitation. Les informations structurelles récoltées ont porté sur les caractéristiques générales de l'exploitation (surface, date d'installation, type de valorisation de la production, etc.), le parcellaire : distribution spatiale et caractéristiques des parcelles (date de plantation, cépage, etc.), la main d'oeuvre et le matériel : nombre, qualité, compétences. Ces informations déjà récoltées lors de précédentes enquêtes ont seulement été mises à jour.

Pour compléter la définition de ce qu'était l'objet cultivé, les modalités d'entretien des parcelles ont ensuite fait l'objet d'un inventaire. En effet, en viticulture, l'organisation en rangées offre des possibilités de mettre en oeuvre différents entretiens du sol. Les viticulteurs ont à leur disposition divers moyens pour entretenir le sol :

- le travail du sol ;
- le désherbage chimique
- l'enherbement

Ces différents types d'entretien peuvent se combiner à l'échelle de la parcelle

- dans l'espace : au sein d'une même parcelle, on peut retrouver jusqu'à trois types d'entretien : un type pour le rang, deux pour les inter-rangs dont les entretiens peuvent alterner d'un inter-rang à l'autre (figure 2.2) ;
- dans le temps : au cours d'un cycle cultural, les types d'entretien peuvent se combiner sur la même surface (par exemple le viticulteur peut désherber chimiquement puis travailler le sol ; ou l'enherbement peut être temporaire, il peut alors être détruit par désherbage chimique ou travail du sol).



FIGURE 2.2 – Combinaison dans l'espace d'entretiens du sol par enherbement et par travail du sol sur les inter-rangs et par désherbage chimique sur le rang

Dans l'exploitation, un viticulteur peut mettre en oeuvre différentes combinaisons d'entretien du sol pour différents lots de parcelles. Par exemple, des parcelles à écartement étroit entre rangs pour lesquelles il n'aurait pas de matériel adapté peuvent être totalement désherbées chimiquement et les parcelles plus larges avoir des inter-rangs travaillés.

Les modalités d'entretien du sol adoptées par un viticulteur conditionnent ainsi les travaux qu'il aura à réaliser au cours d'un cycle cultural sur ses différentes parcelles. La connaissance des modalités d'entretien du sol des parcelles en fonction de leur caractéristiques peut ainsi s'apparenter, en situation de grandes cultures, à la connaissance de l'attribution des cultures aux parcelles dans le cadre des rotations : on cherche à connaître ce qui va définir le contour biophysique des parcelles exploitées, quel visage auront les parcelles.

Finalement la majorité du temps de l'entretien a été consacré à la conduite de la culture. Les informations sur la mise en oeuvre des actions ont été prises pour l'ensemble du cycle cultural. Le cycle peut être découpé en différentes périodes pour le recueil des données. La découpe est réalisée par rapport aux différents travaux qui composent le cycle et au développement végétal des vignes qui détermine des butées temporelles plus ou moins rigides aux travaux à réaliser (Jourdan, 1994). La figure 2.3 présente le calendrier des travaux viticoles.

Dans le cadre des enquêtes trois périodes ont été définies :

- une période automnale qui commence avec le début du cycle (fin des vendanges) jusqu'au début de la taille ;
- une période hivernale qui commence avec la taille et qui se termine au début des premiers traitements phytosanitaires (environ fin avril) ;
- une période printanière et estivale qui s'étend du débournement à la fin du cycle : les vendanges.

Pour chaque période, on a cherché à appréhender comment le viticulteur planifiait ses actions. On a donc utilisé la grille de représentation de la gestion technique d'une sole proposée par Aubry pour obtenir des données sur :

- la caractérisation des opérations à réaliser (intrants, matériel et main d'oeuvre), les parcelles concernées (et si nécessaire leur localisation dans la parcelle), leur positionnement temporel, les indicateurs de déclenchement, et les conditions de faisabilité ;
- la gestion des concurrences éventuelles entre opérations et parcelles (règles de priorité).

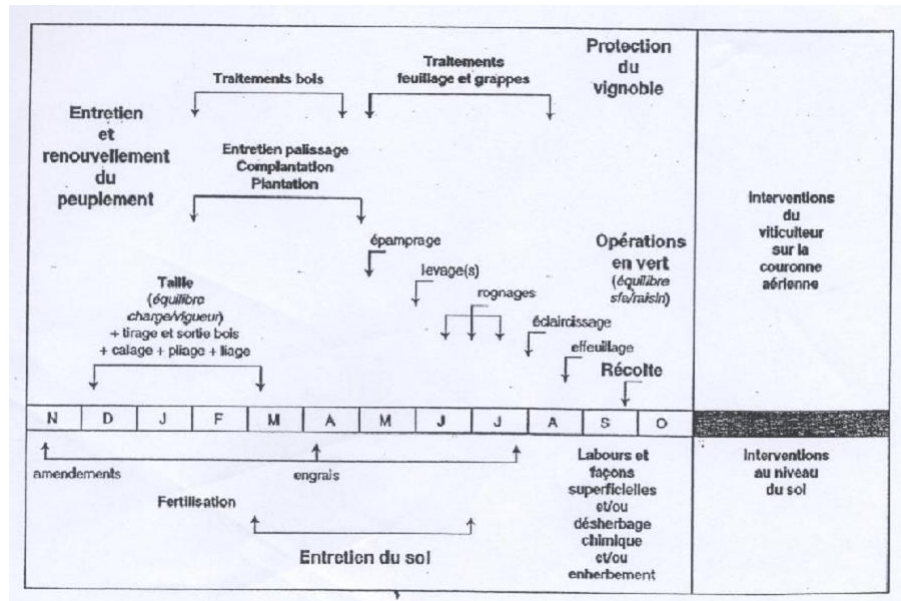


FIGURE 2.3 – Calendrier des travaux viticoles

On a plus insisté sur la caractérisation des opérations d'entretien du sol et de protection phytosanitaire qui influent directement sur la pollution de l'eau par les pesticides. Les autres opérations ont été étudiées parce qu'elles sont susceptibles d'être en concurrence avec les opérations d'intérêt.

2.2.3 Le traitement des enquêtes

Le traitement d'enquêtes visait à :

- catégoriser les parcelles de vigne (en fonction notamment des modes d'entretien du sol qui permet de distinguer des types de rangs et d'inter-rangs), les ressources en matériel et en main d'oeuvre disponibles (types de matériel, types de main d'oeuvre, types de combinaison de matériel et de combinaison de main d'oeuvre);
- distinguer parmi les variables et règles d'action représentant la conduite du vignoble, celles que l'on peut considérer invariantes entre exploitations (soit parce qu'elles le sont vraiment, soit parce que leur variabilité affecte peu in fine les variables d'états du milieu à impact hydrologique), de celles dont la variabilité a été jugée importante à prendre en compte (parce qu'elle influe sur l'évolution des variables d'états du milieu);
- catégoriser (réduire à quelques modalités) ces dernières.

Le traitement a été réalisé de manière experte en analysant chaque élément de la structure d'exploitation (parcellaire, main d'oeuvre, matériel) puis chaque type de travaux composant la conduite du vignoble (travail du sol automnal, fertilisation, protection phytosanitaire, etc.). A chaque fois, une description a été effectuée en présentant la variabilité observée, ce qui nous a permis de distinguer les variables et règles d'action invariantes des autres. Ensuite, une catégorisation a été proposée. Elle s'est basée sur l'influence des modalités sur l'évolution des variables d'états du milieu (par exemple, on a distingué des règles de déclenchement de travaux qui pouvaient amener à réaliser les opérations à deux moments bien distincts).

2.3 Résultats et discussion

2.3.1 Une grande variabilité de l'objet cultivé

La caractérisation des parcellaires des exploitations et des modalités d'entretien du sol a montré que l'ensemble des parcelles qui constitue l'objet cultivé d'une exploitation agricole était très hétérogène pour une exploitation donnée et entre les exploitations.

2.3.1.1 Le parcellaire

Les parcellaires des exploitations enquêtées sont variables en taille. Les surfaces des exploitations étaient inférieures à 10ha dans 30% des cas ; comprises entre 10 et 20ha dans 24% des cas ; comprises entre 20 et 40ha dans 28% des cas et supérieures à 40ha dans 18% des cas.

Ils sont également hétérogènes en terme de répartition spatiale avec une parcellisation généralement importante comme le montre la figure 2.4. Sur les graphiques, l'origine représente le centre d'exploitation qui dans notre zone d'étude est très majoritairement situé dans une commune. Les parcelles sont représentées par des ronds dont la surface est proportionnelle à la surface de la parcelle. Les axes sont gradués selon les coordonnées géographiques.

Suite aux campagnes de réenclavement pour améliorer la qualité des vins produits dans la région, la gamme des cépages des exploitations s'est développée et on trouve généralement un grand nombre de cépages différents dans une même exploitation. Mais pour autant la gamme n'est pas homogène entre les exploitations, par exemple près de 28% des exploitations ne cultivent que des cépages rouges, 17% ne cultivent pas de cépages dits « traditionnels » de la région, etc.

Les parcellaires des exploitations sont donc majoritairement dispersés et ils sont variables entre exploitation. Pour une exploitation donnée, le parcellaire est souvent très hétérogène en terme de cépages mais également sur d'autres caractéristiques comme l'écartement entre rangs ou le système de taille. L'homogénéisation de la conduite est donc rendue difficile.

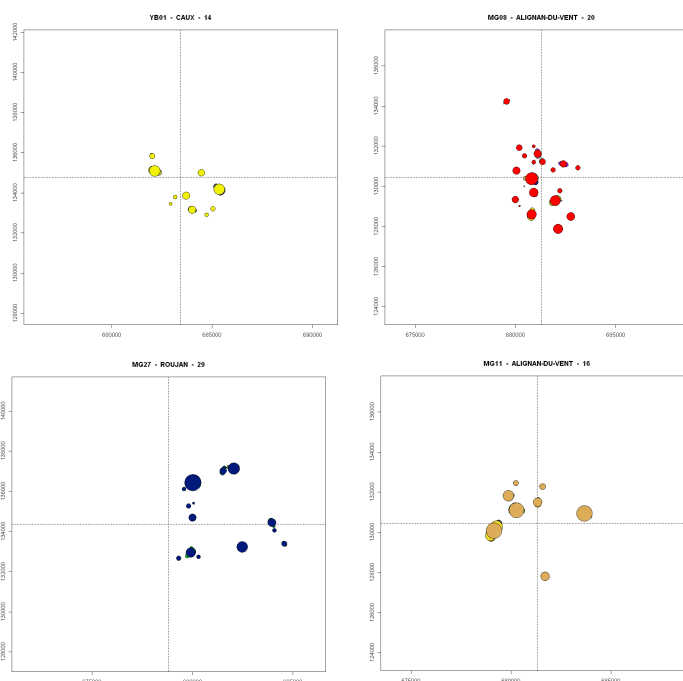


FIGURE 2.4 – Représentation de la répartition spatiale de parcellaires d'exploitations enquêtées

L'origine du graphe représente le centre d'exploitation et les ronds les parcelles de l'exploitation. Leur surface est proportionnelle à celle de la parcelle représentée.

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

Cinq grands types de stratégie d'entretien du sol ont été définies à l'échelle de l'exploitation. Ces stratégies sont basées sur la modalité dominante d'entretien des inter-rangs. En effet, la très grande majorité des viticulteurs enquêtés entretiennent le rang par désherbage chimique. Les cinq stratégies sont :

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

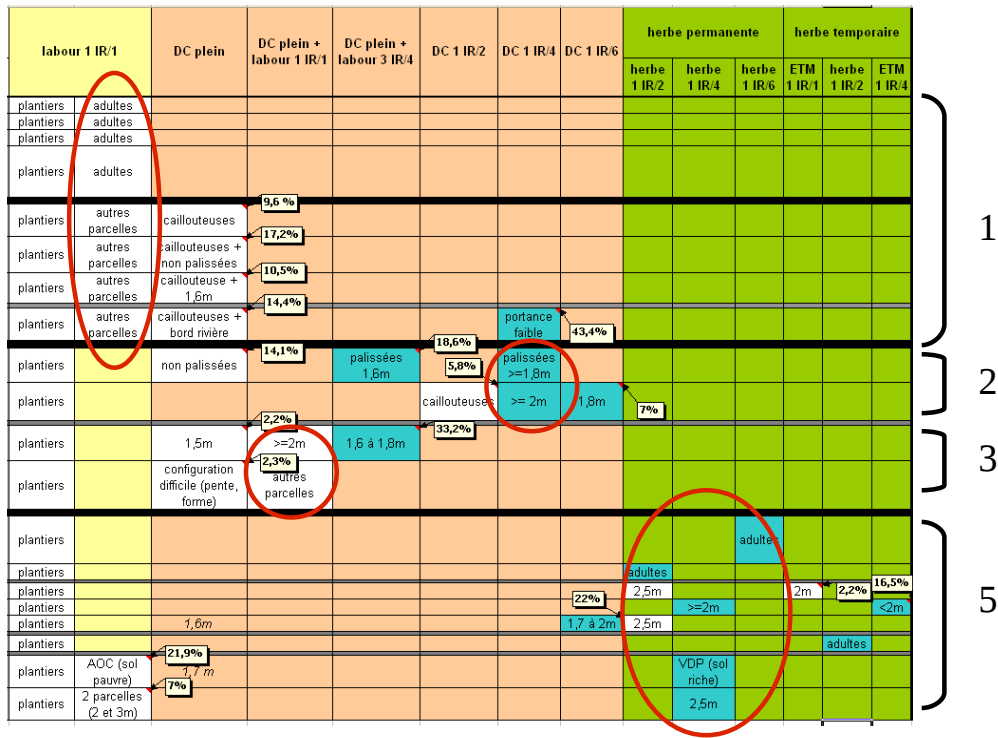


FIGURE 2.5 – Distribution des modalités d'entretien du sol de 20 exploitations (une exploitation par ligne) suivant différents lots de parcelles

DC : Désherbage chimique ; R : Rang ; IR : Inter-rang ; ETM=ENM : Enherbement Naturel Maîtrisé ; VDP : Vin de Pays ; AOC : Appellation d'Origine Contrôlée. Les distances indiquent que le lot de parcelles est défini par l'écartement entre rangs.

La stratégie globale permet de définir les modalités d'entretien du sol pour les parcelles aux caractéristiques les plus répandues dans l'exploitation. Elle introduit ensuite des variations en fonction des contraintes parceliaires qu'ont les viticulteurs, par exemple, pour les parcelles à écartements entre rangs étroits dans lesquels les outils de travail de sol ne rentreraient pas. Des nouveaux choix d'entretien du sol sont alors réalisés pour ces parcelles « à problèmes ».

On illustre avec la figure 2.5 les distributions intra-exploitation observées pour quatre des cinq stratégies présentées (numérotées de 1 à 4) pour les 20 viticulteurs enquêtés lors de la première phase. Les cercles rouges indiquent les parcelles aux caractéristiques les plus répandues dans l'exploitation et qui sont donc entretenues de la façon indiquée par l'intitulé de la stratégie. On voit que pour la stratégie basée sur le travail du sol des inter-rangs (1) une partie des exploitations entretient toutes les parcelles de manière identique alors que d'autres exploitations mettent en oeuvre du désherbage chimique pour les parcelles caillouteuses ou étroites. Une autre variabilité de mise en oeuvre de la stratégie est illustrée par les exploitations dont la stratégie est basée sur une combinaison dans l'espace de l'enherbement et du travail du sol (5). Elles peuvent mettre en oeuvre des variantes en fonction des largeurs des inter-rangs (par exemple, l'enherbement est temporaire dans les parcelles étroites).

On analyse les variations introduites dans les modalités d'entretien du sol plutôt en terme de contraintes physiques que d'objectifs de production. En effet, les productions au sein des exploitations enquêtées sont plutôt homogènes et les viticulteurs mettent rarement en avant cette explication pour justifier les différentes modalités attribuées aux parcelles.

En conclusion, l'organisation en rangées des parcelles concourt à une hétérogénéité intraparcellaire forte des modalités d'entretien du sol et donc des travaux à réaliser. De plus, la diversité des parcelles d'une exploitation augmente l'hétérogénéité du fait de la définition de lots de parcelles redevables de modalités différentes d'entretien du sol.

2.3.2 Des niveaux de ressources variables

2.3.2.1 La main d'oeuvre

Les exploitants peuvent avoir différents statuts : agriculteur à temps plein, pluriactif ou retraité.

Chaque type de main d'oeuvre peut être ensuite à temps plein ou à temps partiel. Le travail en temps partiel peut correspondre à un travail partiel à l'échelle de la semaine ou à un temps partiel à l'échelle annuel, c'est à dire que la personne ne travaille qu'une partie de l'année.

Pour les exploitants, un travail à temps partiel correspond soit à une situation de pluri-activité de l'exploitant soit à la réalisation d'autres activités que la viticulture au sein de l'exploitation sur des temps conséquents : vinification, gestion, autres culture, etc. Pour la main d'oeuvre employée (issue de groupement d'employeurs) cela correspond à un travail de type temps plein mais sur une partie seulement de l'année. Pour les autres types de main d'oeuvre employée et la main d'oeuvre familiale cela correspond à un soutien pour une ou plusieurs activités bien définies et le plus souvent manuelles (ex : taille, relevage). Il est à noter que les exploitants peuvent ne pas être comptés dans la main d'oeuvre effective de l'exploitation si leurs autres activités ne leur permettent que très rarement de participer aux travaux viticoles.

Compte tenu des difficultés économiques auxquelles font face les viticulteurs de la zone, la plupart cherchent à réduire les coûts de main d'oeuvre très importants. Par conséquent, on trouve beaucoup de main d'oeuvre à temps partiel qu'elle soit familiale ou employée et elle peut réaliser des travaux très différents d'une exploitation à l'autre en fonction de ses compétences. Par exemple l'épouse ou la mère d'un viticulteur aide plutôt aux travaux manuels alors que le père d'un viticulteur peut aussi aider à la réalisation des travaux du sol, de la même façon un employé à temps partiel peut réaliser tous les travaux ou être limité aux travaux manuels. Cette situation crée un grand nombre de combinaisons possibles de main d'oeuvre dans les exploitations.

2.3.2.2 Le matériel

Le matériel d'une exploitation viticole peut être divisé en plusieurs catégories :

- le matériel de traction,
- le matériel de pulvérisation,
- le matériel de travail du sol,
- le matériel de broyage (sarments, herbe),
- le matériel tracté autre (épandeur d'engrais, écimeuse,...).

On a cherché à caractériser les différentes compositions en matériel qui existaient pour ces catégories. Il s'avère que les compositions possibles sont très nombreuses et que la quantité d'un matériel donné dépasse souvent la quantité de main d'oeuvre qui peut l'employer. Pour le matériel de traction par exemple, bien que 37% des exploitations n'ait qu'un tractoriste (conducteur), on trouve 81% des exploitations qui ont 2 tracteurs ou plus avec des caractéristiques de puissance, de largeurs et donc de fonctions variées. Il en est de même pour les outils de travail du sol : 91% des viticulteurs ont au moins deux outils.

On a pu constater que les matériels les moins présents en propre dans les exploitations sont les matériels de broyage et les matériels tractés utilisés soit pour des opérations ponctuelles dans le temps (épandeur d'engrais), soit pour permettre la mécanisation d'opérations pouvant être réalisées manuellement (andaineur de sarments, tailleuse, épampreuse,...). Pour autant, les CUMA sont peu développées dans la zone.

En conséquence, les matériels de traction, de pulvérisation et de travail du sol ne sont généralement pas limitants dans les exploitations. Leur diversité est liée aux diversités de fonctions pour lesquelles ils sont employés mais répond également à la variabilité intra-exploitation importante des caractéristiques des parcelles. Les contraintes imposées par le matériel se situent donc sur la nécessaire multiplication de leur nombre pour répondre à différentes contraintes parcellaires et donc sur l'organisation du travail qui doit en découler pour éviter les aller-retour entre les parcelles et le centre d'exploitation.

De plus, malgré la multiplication du matériel, toutes les parcelles ne sont pas mécanisables. D'ailleurs, les parcellaires morcelés et présentant des parcelles de surface moyenne faible, n'ont pas poussé les viticulteurs à investir dans du matériel dans le but de mécaniser les opérations manuelles. On observe donc encore dans la zone d'étude une grande part de travaux réalisés manuellement.

2.3.3 Des modalités de conduites techniques hétérogènes

Pour présenter les résultats obtenus sur l'analyse des conduites techniques, on présente deux cas illustratifs de la formalisation réalisée :

- un exemple de l'analyse réalisée pour chacun des travaux du cycle cultural;
- un exemple de l'analyse de l'organisation du travail.

On indique ainsi comment la connaissance sur les plans d'action a été constituée et catégorisée pour la modélisation.

2.3.3.1 Sur les différents travaux du cycle cultural

Exemple d'une analyse de conduite technique d'une opération : le travail du sol d'automne (extrait de l'annexe A)

Quarante viticulteurs sur cinquante-quatre effectuent ou peuvent effectuer un travail du sol à l'automne. Parmi eux, 34 le réalisent systématiquement et 6 de manière facultative pour des cas particuliers (herbe, ornières,...).

Parmi ceux qui travaillent le sol à l'automne :

- 4 réalisent *2 à 3 passages* : un premier pour décompacter à la sous-soleuse puis un second (voire un troisième) pour aplanir et/ou enfouir l'engrais, parmi eux, 3 fertilisent à l'automne ;
- 18 réalisent *un seul travail du sol au cadre avec un déclenchement immédiatement après vendanges* ou quelques jours après la fin des vendanges, parmi eux 6 peuvent fertiliser à l'automne ;
- 2 réalisent *un seul travail du sol avec un outil à dent après application de cuivre* (ils ne fertilisent pas à l'automne) ;
- 4 réalisent *un seul travail du sol au cadre après fertilisation* ;
- 6 réalisent *un seul travail du sol au cadre en période automnale mais pas directement après vendanges* (cas de travail de cave par exemple,...), parmi eux, 1 seul fertilise
- 6 réalisent *de manière facultative un travail du sol au cadre* sur des parcelles en cas de présence d'herbe, d'ornières. Les parcelles concernées peuvent être uniquement les plantiers ou les parcelles AOC ou toutes les parcelles de l'exploitation mais il ne travailleront jamais l'ensemble de l'exploitation à cette période. Parmi eux, 3 réalisent la fertilisation à l'automne.

La *règle de fin de la période de travail du sol varie* et ne semble dépendre ni de la règle de déclenchement, ni de la réalisation de la fertilisation. Les différentes règles de fin sont : arrêt dès que la taille commence sur l'exploitation, arrêt pour une parcelle quand la taille ou la prétaillage débute sur la parcelle, arrêt fin novembre, arrêt fin décembre, pas de règle de fin (le travail du sol se poursuit tant qu'il n'est pas terminé).

De manière générale, *les travaux du sol concernent tous les inter-rangs entretenus par travail du sol ou combinaison dans le temps de travail du sol et de désherbage chimique*. 5 viticulteurs travaillent 1 inter-rang sur 2 pour garder un inter-rang portant pour la taille (et notamment le prétaillage). Quand ils fertilisent (2) le travail du sol concerne alors les inter-rangs fertilisés. 1 viticulteur ne travaille qu'1 inter-rang sur 2 pour laisser un enherbement hivernal se développer sur les autres inter-rangs.

Seuls 2 viticulteurs *n'effectuent pas ce travail du sol sur l'ensemble de l'exploitation* : 1 ne l'effectue que dans les parcelles vendangées à la machine et 1 uniquement dans les plantiers (jeunes vignes) et les terres rouges.

Les *parcelles prioritaires pour le travail du sol varient en fonction des viticulteurs* mais ne semblent dépendre ni des travaux réalisés, ni des règles de décisions. Parmi les 34 qui réalisent systématiquement un travail du sol, 29 ont fourni une règle de priorités : pas de priorité (11), priorité aux terres séchantes (10), priorité aux

TABLE 2.1 – Règles et variables pour l'action avec des modalités hétérogènes en fonction des conduites techniques (1)

Travaux	Type de règles / variables pour l'action	Description	Nombre de modalités	Effet sur les caractéristiques des actions	Effet sur la répartition spatio-temporelle des actions	Variabilité paramétrable dans le modèle pour l'action
Travail du sol automnal	déclenchement	Détermine quand le travail du sol commence sur l'exploitation	3	-	+	oui
	fin	Détermine quand le travail du sol se termine sur l'exploitation	3	-	+	oui
Fertilisation	nombre d'itération	Détermine le nombre de travaux du sol réalisés à cette saison	2	-	+	non
	fréquence	Détermine la fréquence de la fertilisation sur l'exploitation (e.g. 1 an sur 2, moitié de l'exploitation chaque année, etc)	4	-	+	non
	déclenchement	Détermine quand la fertilisation est réalisée : (i) automne, printemps ou les deux ; (ii) quelles sont les règles de déclenchement	(i)3 +(ii)6	-	+	oui
Taille	déclenchement	Détermine quand la taille commence sur l'exploitation	4	-	+	oui
	lots de parcelles	Détermine les lots de parcelles qui sont pré-taillés et donc la vitesse de la taille	7	-	+	oui
Broyage des sarments	déclenchement	Détermine quand le broyage des sarments est déclenché (e.g. quand 2ha sont taillés)	5	-	+	oui
Travail du sol de reprise (fin d'hiver)	déclenchement	Détermine quand le travail du sol commence sur l'exploitation	6	-	+	oui
	modalité	Détermine l'outil avec lequel est réalisé le travail du sol	2	+	-	non
Désherbage chimique (fin d'hiver)	déclenchement	Détermine quand le désherbage chimique commence sur l'exploitation	5	-	+	oui
	modalité	Détermine les types d'herbicides utilisés pour le désherbage chimique (pré-levée, post-levée)	3	+	-	non
Plantation	déclenchement	Détermine quand la plantation débute sur l'exploitation	4	-	+	oui
	fin	Détermine la butée temporelle pour la réalisation de la plantation	3	-	+	non
Travail du sol printanier	déclenchement	Détermine quand un travail du sol de printemps est lancé sur l'exploitation	3	-	+	oui
	lots de parcelles	Détermine la surface sur laquelle porte la condition de déclenchement du travail du sol (e.g. 50% des parcelles présentent un couvert herbacé important)	3	-	+	oui
Désherbage chimique (printemps)	déclenchement + lots de parcelles	Détermine quand le désherbage chimique commence sur l'exploitation et quelles parcelles et surfaces dans les parcelles (e.g. Rang) sont désherbées	2	-	+	oui
	modalités + lots de parcelles	Détermine la méthode d'épamprage (mécanique, chimique) et les parcelles épamprées (selon les cépages)	6	-	+	oui

+ : effet existant ; - : effet absent

parcelles compactées (3), priorité aux terres séchantes et aux parcelles compactées (2), priorité aux parcelles peu portantes (2), priorité aux parcelles avec le plus d'herbe (1). Il est à noter que parmi les 11 qui n'ont pas de règle de priorité, 7 ont moins de 12ha en vignes, 2 peuvent travailler à 2 tracteurs en parallèle et 1 a une grande majorité de parcelles en terres séchantes. Pour ce dernier, une règle de priorité sur les parcelles séchantes (règle la plus courante) n'est donc pas très pertinente et pour les autres, on peut éventuellement supposer qu'ils ont le temps ou les moyens de faire ce travail du sol tous les ans.

Discussion du cas illustratif Cette description de la conduite technique du travail du sol de l'automne, qui utilise comme grille de lecture des pratiques le modèle d'action (Aubry, 1995), nous permet de comprendre comment est gérée cette opération de travail du sol en fonction des exploitations.

On constate tout d'abord, qu'elle n'a pas lieu dans toutes les exploitations. Parmi les viticulteurs qui la réalisent le nombre d'interventions peut varier de 1 à 3 : il peut y avoir répétition de l'opération. Ensuite, certains viticulteurs la réalisent sur l'ensemble des parcelles alors que d'autres sélectionnent les parcelles qui en seront redevables. Il peut même y avoir un niveau de détermination spatiale intra-parcellaire du lieu de réalisation de l'opération.

On observe que l'opération n'est pas commencée au même moment à l'échelle de l'exploitation : il peut y avoir une liaison avec la fin de réalisation de l'opération de fertilisation ou celles de vendanges. Et on observe également qu'elle peut se terminer à des moments différents. D'ailleurs, on comprend que l'opération peut se terminer à l'échelle de l'exploitation alors qu'elle n'a pas été réalisée sur toutes les parcelles.

Finalement, les viticulteurs peuvent exprimer des règles de priorités entre les parcelles. On constate que ces règles ne sont pas exprimées dans certains cas et notamment des cas de faibles contraintes sur les ressources. La butée temporelle pour le travail du sol a dans ce cas moins de probabilité d'être atteinte avant que toutes les parcelles n'aient été travaillées.

Dans le cas du travail du sol d'automne, la formalisation du discours des viticulteurs nous a permis de faire l'inventaire de l'ensemble des éléments qui concourraient à l'action : les règles de déclenchement et de fin des travaux, des règles d'arbitrage entre parcelles, etc. On a également pu constater la variabilité des choix de conduite entre exploitations. Ils nous a donc fallu définir, dans le cadre d'une modélisation de cette opération, quelle variabilité il nous semblait importante que l'on puisse exprimer et donc identifier quelle variabilité pouvait influencer sur les impacts hydrologiques soit en modifiant les modalités des opérations, soit en modifiant leur répartition spatio-temporelle. Pour ce cas du travail du sol, deux variabilités ont été retenues : la règle de déclenchement de l'opération à l'échelle de l'exploitation ; la règle de fin de l'opération à l'échelle de l'exploitation. Ces choix ont ainsi été effectués selon le degré d'impact a priori de cette variabilité sur le résultat d'une modélisation et sur la possibilité de prendre en compte la variabilité dans le modèle (par exemple, il nous a semblé très compliqué de définir quelles pouvaient être les parcelles compactées pour faire jouer différentes règles de priorités).

La variabilité retenue pour la modélisation L'ensemble de la formalisation des connaissances est regroupé dans l'annexe A. On présente ici (tableaux 2.1 et 2.2) uniquement les 36 variables et règles pour l'action qui ont été identifiées comme hétérogènes d'une exploitation à l'autre et dont la variabilité nous a semblé importante à prendre en compte pour la modélisation soit parce qu'elles modifiaient la répartition spatio-temporelle des actions d'entretien

TABLE 2.2 – Règles et variables pour l'action avec des modalités hétérogènes en fonction des conduites techniques (2)

Travaux	Type de règles / variables pour l'action	Description	Nombre de modalités	Effet sur les caractéristiques des actions	Effet sur la répartition spatio-temporelle des actions	Variabilité paramétrable dans le modèle pour l'action
Traitements anti-oidium	déclenchement (premier traitement)	Détermine quand le premier traitement anti-oidium est lancé sur l'exploitation (selon dates ou stades phénologiques)	6	-	+	oui
	déclenchement traitements suivants	Détermine la cadence entre les traitements préventifs	5	-	+	oui
		Détermine comment sont déclenchés les traitements curatifs	2	-	+	non
	lots de parcelles modalités fin (dernier traitement)	Détermine si en cas de prévision de pluie les traitements sont avancés	2	-	+	oui
		Détermine les lots de parcelles recevables des traitements préventifs (selon les cépages)	5	-	+	oui
		Détermine les traitements préventifs reçus par les plantiers	3	-	+	non
Détermine les modalités d'utilisation du soufre poudre		4	+	+	non	
Traitements anti-mildiou	Détermine quand le dernier traitement anti-oidium est réalisé au niveau de l'exploitation	4	-	+	oui	
	déclenchement	Détermine comment sont déclenchés les traitements anti-mildiou	6	-	+	oui
	modalités	Détermine les modalités d'utilisation du cuivre	2	+	-	non
	lots de parcelles	Détermine les traitements reçus par les plantiers	3	-	+	non
		Détermine quand le dernier traitement anti-mildiou est réalisé au niveau de l'exploitation en cas d'année à faible pression de la maladie	8	-	+	oui
	fin (dernier traitement)	Détermine quand le dernier traitement anti-mildiou est réalisé au niveau de l'exploitation en cas d'année à pression de la maladie	5	-	+	oui
Traitements contre les vers de grappe	déclenchement + lots de parcelles	Détermine comment sont déclenchés les traitements contre les vers de grappe et sur quelles parcelles	10	-	+	non
Traitements contre la cicadelle	déclenchement + lots de parcelles	Détermine comment sont déclenchés les traitements contre la cicadelle de la flavescence dorée et sur quelles parcelles	7	-	+	non
Ensemble des traitements	modalités	Détermine les modalités de couplages entre les traitements	6	-	+	oui
		Détermine le type de pulvérisateur utilisé (pneumatique, à dos, etc.)	4	+	+	oui
	Détermine les modalités de pulvérisation (e.g. Passage 1 inter-rangs sur 2 ou sur 3, etc.)	4	+	+	oui	

+ : effet existant ; - : effet absent

du sol et d'application de pesticides, soit parce qu'elles en modifiaient les caractéristiques. En conséquence, ce sont ces variables et règles qui ont été en partie paramétrées dans le modèle décisionnel développé pour représenter diverses conduites techniques d'exploitation (certaines ne le sont pas encore pour des questions de manque de temps).

Les règles et variables identifiées concernent très majoritairement les actions d'entretien du sol ou d'application de pesticides (27) mais une partie concerne d'autres travaux. En effet, parmi les règles et variables pour l'action concernant les actions d'entretien du sol ou d'application de pesticides, près de la moitié porte sur des règles de déclenchement (12), or ces règles de déclenchement peuvent prendre la forme de règles d'enchaînement entre deux travaux et par conséquent, nécessiter la représentation d'autres travaux, comme on a pu le voir pour le travail du sol automnal et la fertilisation.

On peut remarquer que la moitié des règles et variables identifiées permettent de définir la conduite technique de la protection phytosanitaire (tableau 2.2). Ceci est lié :

- aux répétitions des traitements au cours de la phase végétative de la vigne : les règles et variables pour l'action doivent définir comment est géré chacun des traitements réalisés ;
- aux possibilités nombreuses de modalités de réalisation (pulvérisateur, fréquence de passage dans les inter-rangs) qui influent sur la concentration en matières actives au sol et qui doivent donc être prises en compte ;
- à la variabilité de constitution des lots de parcelles pour la protection phytosanitaire entre les exploitations (dans le cas de l'entretien du sol, ces lots de parcelles sont fortement dépendants des modalités d'entretien du sol mises en oeuvre dans l'exploitation, voir 2.3.1.2).

Parmi les règles et variables identifiées comme hétérogènes, on constate qu'il n'y a pas de règles de faisabilité. De manière générale, lors des enquêtes, les viticulteurs ont peu abordé les règles de faisabilité des travaux et les questions posées nous ont amené des réponses homogènes avec une variabilité difficile à identifier. Par exemple, pour le travail du sol automnal, tous les viticulteurs ont une règle unique qui est : « le sol doit être travaillable ». On verra au chapitre 8 que si la règle est commune, son interprétation par les viticulteurs peut différer. Concernant les règles de faisabilité, ce sont donc généralement des règles communes qui ont été adoptées selon nos connaissances et nos interprétations.

La validation de l'hypothèse sur la représentation du cycle cultural La formalisation des conduites techniques des différents travaux réalisés au cours du cycle a montré qu'il existait beaucoup de liaisons entre les travaux qui s'exprimaient sous la forme de règles de déclenchement du type « finir de broyer les sarments avant de travailler le sol » ou comme pour le cas illustratif « finir de fertiliser avant de travailler le sol ». Ces liaisons définissent alors des séquences de travaux qu'il nous faut représenter si une opération d'entretien du sol ou de protection phytosanitaire s'en trouve dépendante. Comme les opérations d'entretien du sol sont fortement impliquées dans de telles séquences, cela valide la nécessité de travailler sur l'ensemble du cycle cultural.

2.3.3.2 Sur l'organisation du travail

Comme Jourdan (1994) l'a indiqué, le vigneron mobilise des savoirs acquis, expérimentés, pour synchroniser ses actions. Il planifie ses travaux les uns par rapport aux autres, afin de stabiliser une organisation d'un ensemble de travaux lui permettant d'atteindre les objectifs cultureux qu'il se fixe. Le vigneron hiérarchise différents travaux pour un intervalle de temps donné. Il établit des priorités pour le choix de ceux à réaliser. Les travaux dépendent ainsi les uns des autres. Les priorités sont fonction des butées temporelles qu'attribue le vigneron à chacun de ses travaux. Par exemple, pour la période « hiver - début de printemps », la réalisation des travaux de printemps est dépendante de la fin de la taille qui doit être terminée avant le débourrement.

Ainsi chaque viticulteur applique une organisation du travail en fonction des périodes du cycle cultural. On illustre ci-dessous un exemple d'analyse de l'organisation du travail pour la période automnale.

Exemple de l'organisation du travail à la période d'automne (extrait de l'annexe A)

Concernant les priorités entre travaux, elles semblent identiques chez tous les viticulteurs : la fertilisation est prioritaire sur l'installation des piquets et des fils (pour le palissage, dans les parcelles récemment plantées) qui est prioritaire sur le travail du sol. Cela semble logique compte-tenu du fait que la fertilisation et l'installation des piquets sont des chantiers qui requièrent souvent soit du matériel en prêt ou en copropriété, soit de la main d'œuvre extérieure, les viticulteurs peuvent donc difficilement reporter ces travaux quand les intrants, le matériel et la main d'œuvre sont disponibles. Concernant la répartition de la main d'œuvre et du matériel, 2 viticulteurs font le travail du sol et la fertilisation en parallèle (à la parcelle, la fertilisation est réalisée d'abord dans la mesure du possible), tous les autres viticulteurs, même s'ils ont le matériel et la main d'œuvre pour réaliser des travaux en parallèle ne font qu'une opération à la fois en y attribuant toute la main d'œuvre disponible.

Discussion du cas illustratif On peut voir que les viticulteurs mettent en oeuvre des règles d'arbitrage entre les différents travaux à réaliser et que ces règles s'appuient sur les contraintes de ressources. Par ailleurs, on constate que l'allocation des ressources peut varier d'une exploitation à l'autre en regard des priorités, des objectifs de travail et des ressources. Par exemple, les viticulteurs qui choisissent de positionner leurs ressources sur l'opération la plus prioritaire et de faire les opérations les une après les autres s'assurent la réalisation de l'opération la plus importante. Ceux qui mettent en oeuvre plusieurs opérations simultanément identifient les mêmes priorités mais adoptent une organisation différente qui semble tout autant répondre à leur règle d'arbitrage en terme de résultats car leurs contraintes sur les ressources et le parcellaire sont différentes.

2.4 Conclusion

2.4.1 Un nombre limité d'opérations qui modifie l'infiltrabilité et la concentration en pesticides mais un grand nombre d'actions à modéliser

Les opérations qui ont un effet sur les variables de pression sont peu nombreuses et sont majoritairement des actions d'entretien du sol ou de protection phytosanitaire². On a pu constater que les actions liées à l'application de pesticides, globalement, étaient réalisées de manière assez indépendante : elles dépendent peu de règles d'enchaînement et sont fortement prioritaires en ce qui concerne l'allocation des ressources. Leurs caractéristiques et leur répartition spatio-temporelle pourraient être décrites avec un nombre limité de processus agro-techniques comme dans le cas du modèle SACADEAU (Salmon-Monvolia et al., 2011). A l'opposé, les actions de travail du sol sont soumises à des règles d'enchaînement car devant être réalisées après d'autres opérations (e.g. pour enfouir l'engrais ou les sarments) et elles ont des priorités faibles de réalisation qui les font passer dans les dernières opérations pour l'allocation des ressources. En effet, elles sont toujours considérées comme reportables. De plus, les actions de travail du sol, en fonction des stratégies, sont répétées plusieurs fois au cours d'un cycle cultural. Cette situation conduit à devoir prendre en compte la représentation d'un grand nombre d'opérations du cycle cultural.

La nécessité de représenter la variabilité spatio-temporelle de l'infiltrabilité de la surface du sol pour évaluer les impacts hydrologiques des pratiques dans l'agro-écosystème étudié accroît ainsi la nécessité d'intégration des processus agro-techniques. Par conséquent l'organisation spatiale intra-parcellaire des cultures en rangées qui laisse au sol un rôle à jouer significatif dans les processus hydrologiques impose donc une représentation élargie de ces processus.

2.4.2 Des conduites techniques variées sur des parcelles hétérogènes avec de fortes contraintes sur les ressources

La second point mis en avant par l'étude des processus techniques est la grande variabilité de mise en oeuvre des processus de gestion technique. La conceptualisation de l'action proposée par Aubry (1995) s'adapte bien au système de culture étudié et permet de définir un cadre commun pour les processus sous dépendance d'un ensemble de variables et de règles pour l'action. Cependant, on a pu observer que les modalités des variables et règles nécessaires à prendre en compte dans le cadre de notre problématique variaient fortement d'une exploitation à l'autre et particulièrement en ce qui concerne les règles de déclenchement des opérations. En cherchant à mettre en cohérence leurs pratiques avec leurs contraintes et leurs objectifs, les viticulteurs ne définissent pas tous les mêmes butées temporelles pour les différents travaux. En effet, ils n'ont pas tous les mêmes contraintes sur les ressources, leurs parcelles sont souvent hétérogènes sur leur caractéristiques et leurs modalités d'entretien du sol. Par conséquent, ils doivent adapter leur organisation des travaux et donc leurs pratiques pour parvenir à leurs objectifs.

De plus, les systèmes de culture étudiés, bien qu'en monoculture, offrent une flexibilité importante pour les choix tactiques. En effet, du fait de la partition spatiale des vignes, il existe une certaine déconnection entre les opérations à mettre en oeuvre sur les différents « composantes-lieux » de la parcelle : la plante, le rang, l'inter-rang. La multiplicité des lieux des actions dans une parcelle offre une plus grande possibilité d'enchaînement des actions, ce

2. Une opération d'application d'herbicide pour détruire des bourgeons surnuméraires des vignes (l'épamprage) fait partie des opérations qui modifie la concentration en matières actives au sol.

qui peut expliquer la variabilité particulière des règles de déclenchement des opérations.

En conclusion, la représentation des caractéristiques des actions à portée hydrologique et leur répartition spatio-temporelle nécessite la prise en compte de la majorité des opérations du cycle cultural dans un modèle qui offre une structure explicite pour tester les variabilités des processus de gestion technique en fonction de différentes contraintes sur les ressources et le parcellaire.

Remerciements

Je tiens à remercier les 54 viticulteurs qui ont accepté de répondre aux enquêtes. Merci beaucoup à Isabelle Caujolle qui a réalisé avec grand soin une partie des enquêtes. Merci à Anne Biarnès et Jean-Marc Barbier pour la transmission de leur expérience et de leurs connaissances, leur appui et leur participation active. Merci à Isabelle Michel pour son enseignement du modèle d'action. Merci à Michael Rabotin et Jean-Stéphane Bailly pour leur aide conséquente à la réalisation des graphiques constitutifs de la figure 2.4.

Bibliographie

- Aubry, C. (1995). *Gestion de la sole d'une culture dans l'exploitation agricole. Cas du blé d'hiver en grande culture dans la région picarde*. PhD thesis, INA P-G, Paris.
- Aubry, C. (2000). Une modélisation de la gestion de production dans l'exploitation agricole. *Revue française de gestion*, 129 :32–46.
- Aubry, C. (2007). La gestion technique des exploitations agricoles. composante de la théorie agronomique. mémoire HDR.
- Aubry, C. and Michel-Dounias, I. (2006). L'agriculteur acteur et décideur. systèmes de culture et décisions techniques dans l'exploitation agricole. In *L'agronomie aujourd'hui*, collection Synthèses, pages 57–73. T. Doré, M. le Bail, P. Martin, B. Ney, J. Roger- Estrade (Coord.), quae edition.
- Bellon, S., Girard, N., and Guérin, G. (1999). Caractériser les saisons-pratiques pour comprendre l'organisation d'une campagne de pâturages. *Fourrages*, 158 :115–132.
- Bellon, S., Lescourret, F., and Calmet, J. (2001). Characterisation of apple orchard management systems in a french mediterranean vulnerable zone. *Agronomie*, 21(3) :203–213.
- Biarnès, A., Bailly, J., and Boissieux, Y. (2009). Identifying indicators of the spatial variation of agricultural practices by a tree partitioning method : The case of weed control practices in a vine growing catchment. *Agricultural Systems*, 99(2-3) :105–116.
- Girard, N., Bellon, S., Hubert, B., Lardon, S., Moulin, C., and Osty, P. (2001). Categorising combinations of farmers' land use practices : an approach based on examples of sheep farms in the south of france. *Agronomie*, 21(5) :435–459.
- Jourdan, B. (1994). Activité du vigneron et conception d'un système d'aide à la décision en agriculture. In *Ergonomie des situations informatisées*. J. Theureau et F. Jeffroy, octares edition.
- Luneau, C. (2004). Analyse des stratégies de lutte contre le mildiou pour l'optimisation de l'utilisation du cuivre en viticulture biologique en réponse à la nouvelle réglementation européenne.
- Papy, F. (1994). Working knowledge concerning technical systems and decision support. In *Rural and farming systems Analysis. European perspectives*, pages 222–235. Dent, J.B., Mc Gregor, M.J.(eds), CAB international edition.
- Salmon-Monviola, J., Gascuel-Odoux, C., Garcia, F., Tortrat, F., Cordier, M., Masson, V., and Trépos, R. (2011). Simulating the effect of technical and environmental constraints on

the spatio-temporal distribution of herbicide applications and stream losses. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 140(3-4) :382–394.

Sebillotte, M. and Soler, L. (1990). Les processus de décision des agriculteurs. acquis et questions vives. In *Modélisation systémique et systèmes agraires*, pages 103– 117. Brossier J., Vissac B. et Lemoigne J.L. (Eds), Paris, INRA edition.

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.

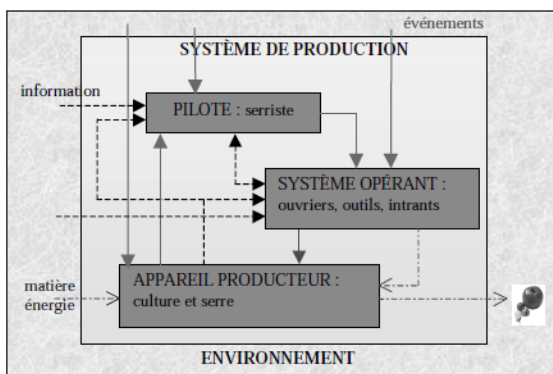


FIGURE 3.1 – Système de production agricole (exemple d'une production sous serre)

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.

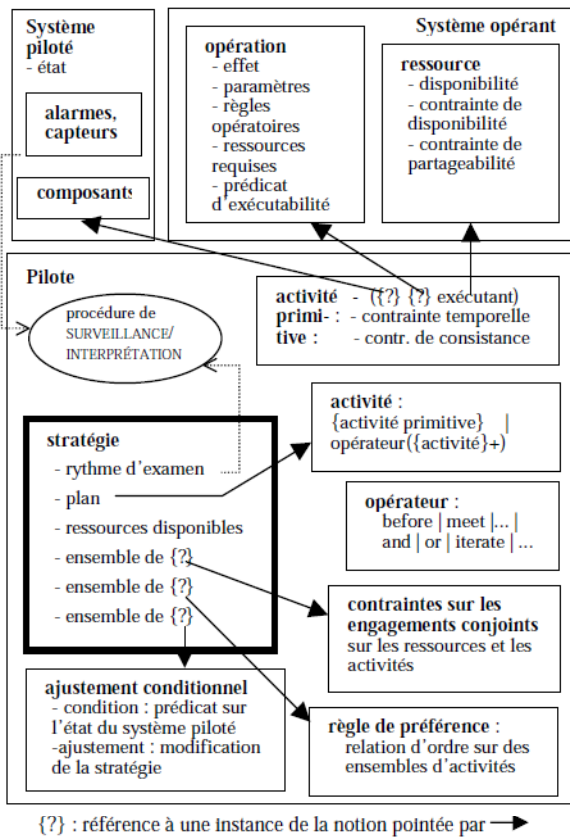


FIGURE 3.2 – Composants du pilote et principales références aux autres sous-systèmes

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

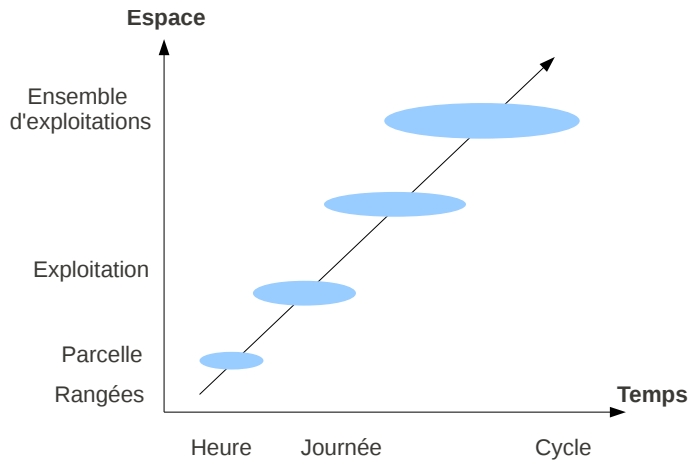


FIGURE 3.3 – Les échelles dans DHIVINE

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*.

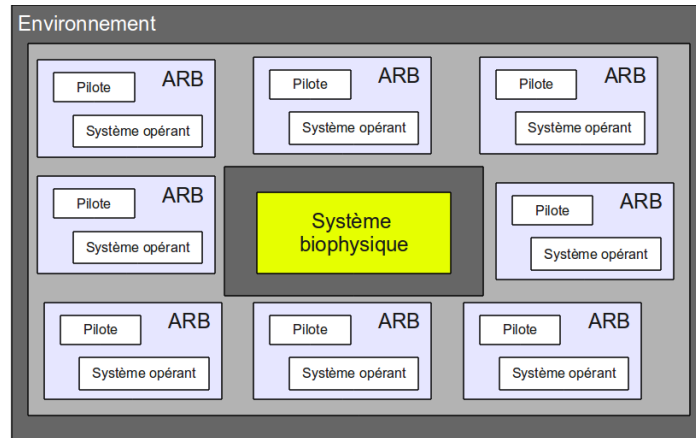


FIGURE 3.4 – Le système de production dans DHIVINE

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.

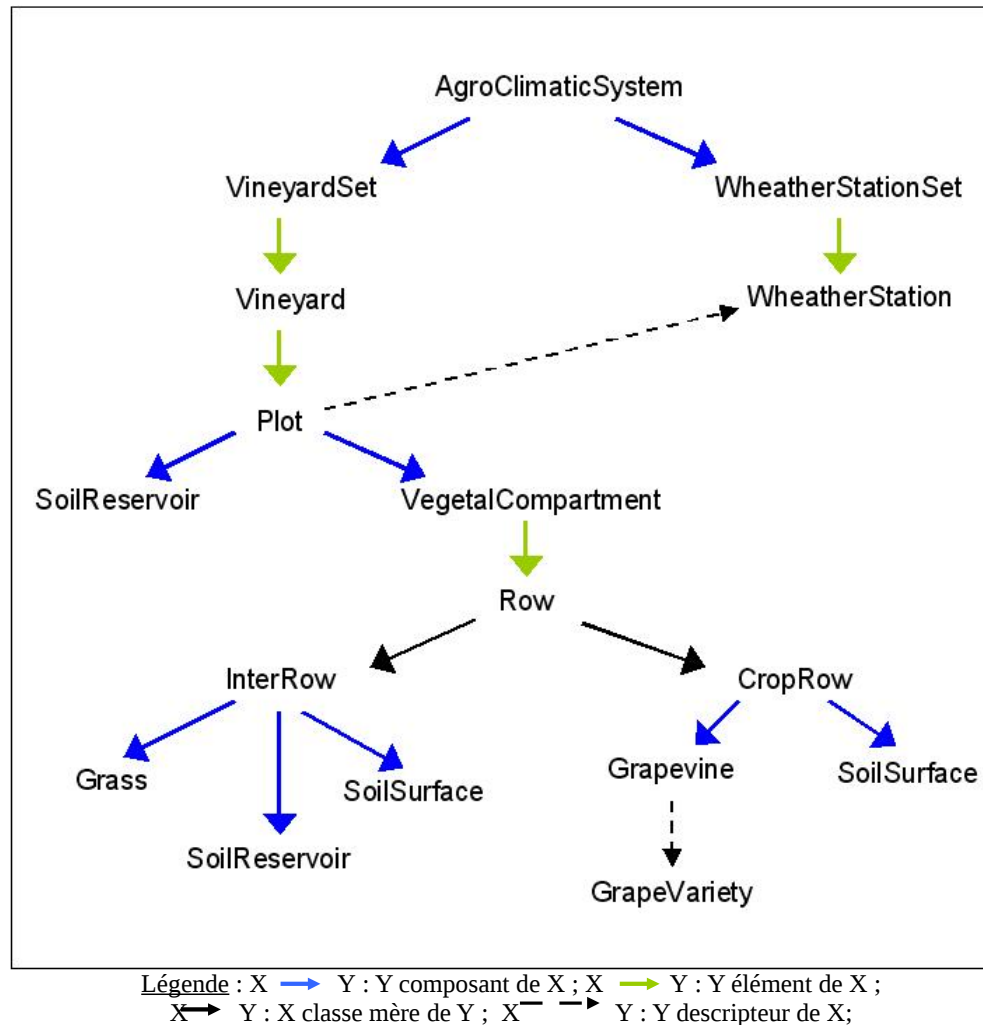


FIGURE 3.5 – Architecture du système biophysique dans DHIVINE

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.

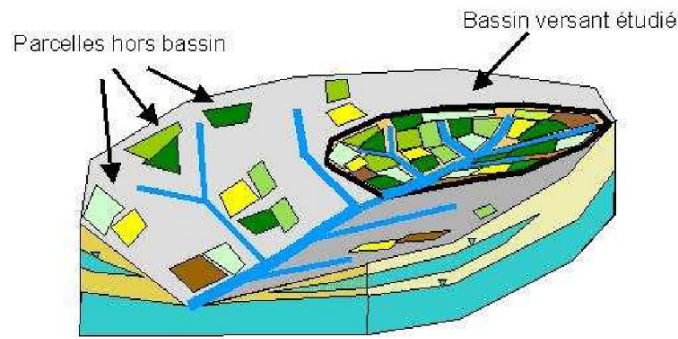


FIGURE 3.6 – Répartition spatiale des parcelles modélisées sous DHIVINE

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).

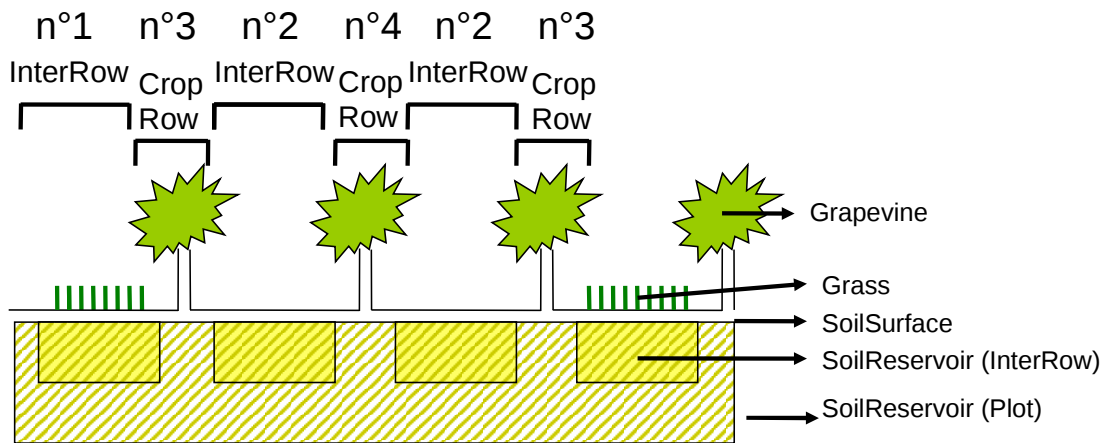


FIGURE 3.7 – Structure de la parcelle dans DHIVINE

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 (Relier 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* : éci-meuse/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 éci-mage), 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*):

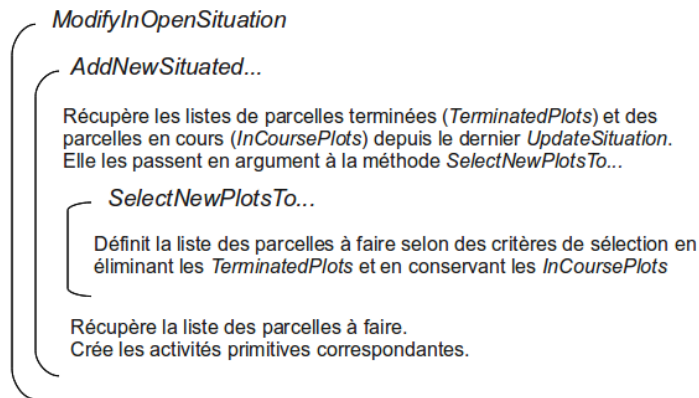


FIGURE 3.8 – Constitution dynamique des listes d'activités par trois méthodes des chantiers

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.

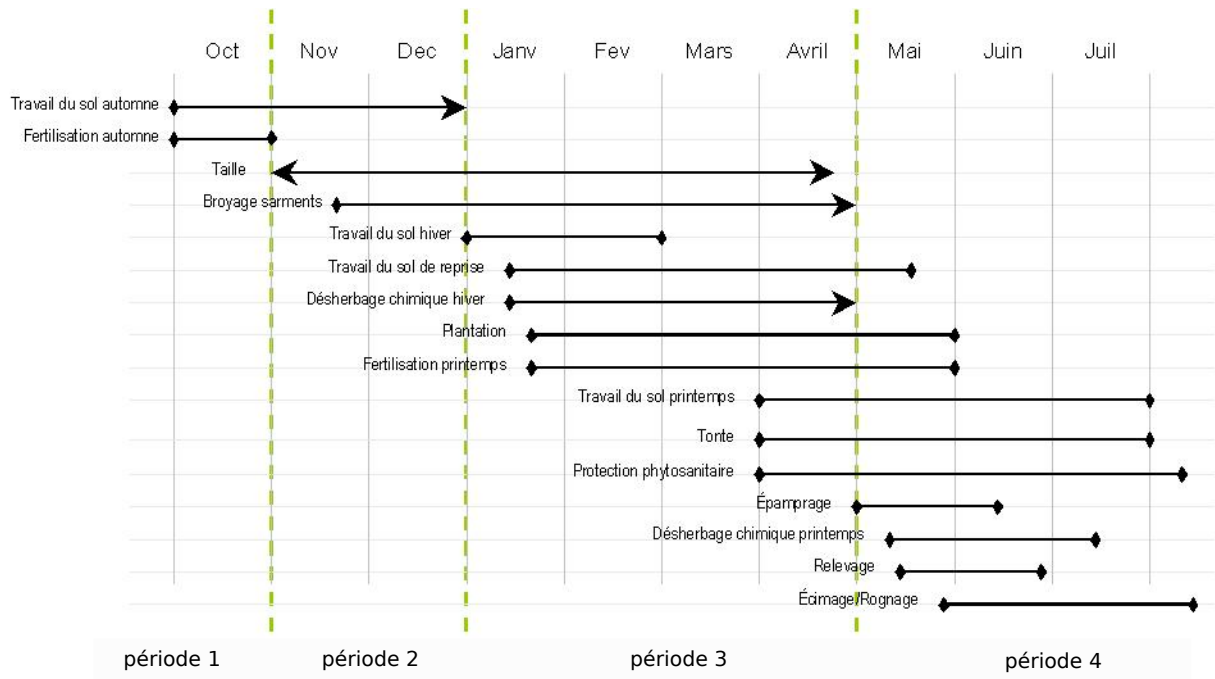


FIGURE 3.9 – Périodes dont dépend l'organisation du travail

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

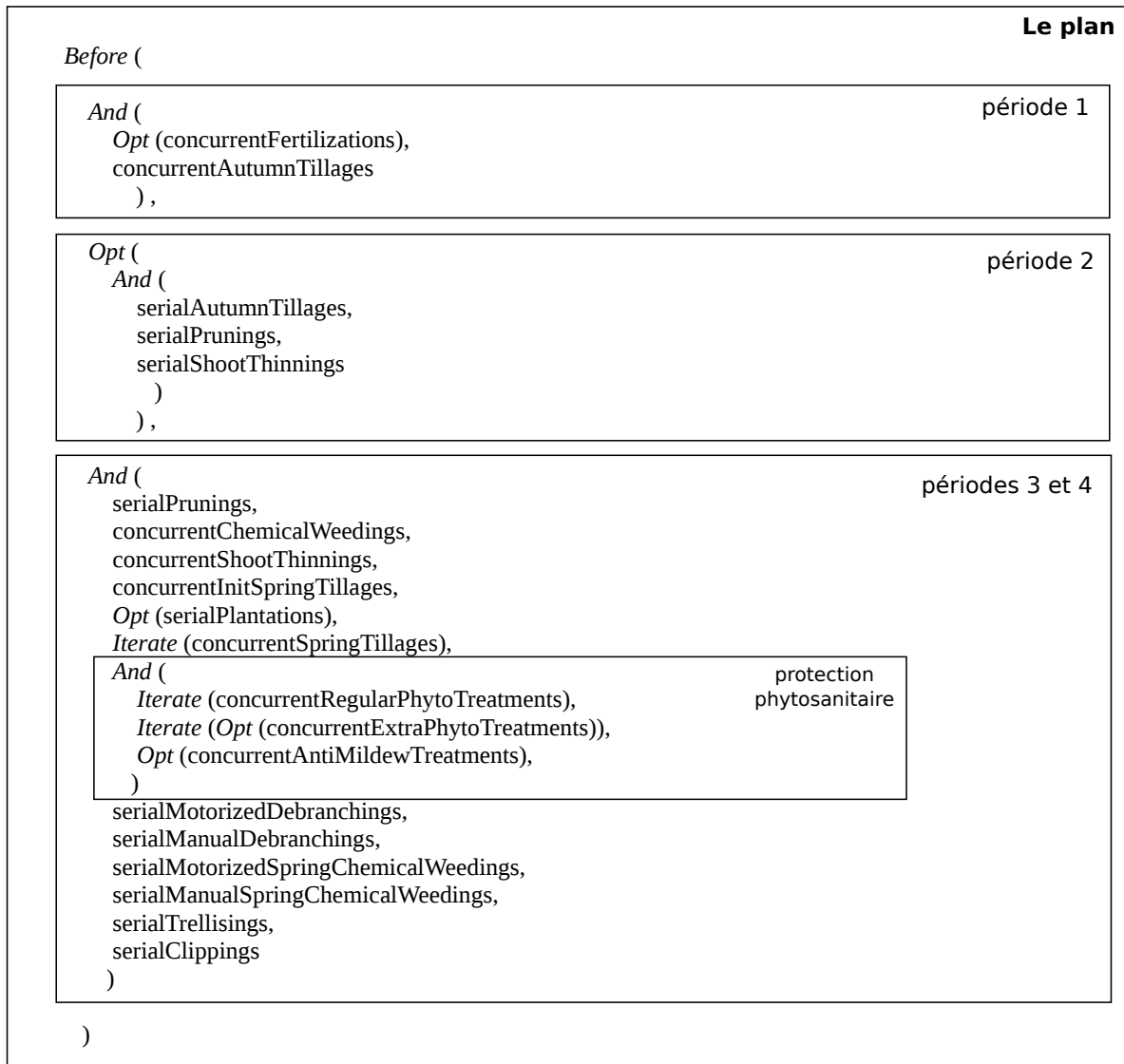


FIGURE 3.10 – Exemple d'un plan d'activité dans DHIVINE

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.

Deuxième partie

Etude et modélisation des processus bio-physiques qui modifient les variables de pression

Cette partie présente l'étude et la modélisation des processus bio-physiques qui déterminent directement ou indirectement le fonctionnement hydrologique du milieu. On a vu que la dynamique de l'infiltrabilité de la surface du sol est l'un des processus à effet direct sur les processus hydrologiques. Son analyse et sa modélisation sont présentés dans quatre chapitres (correspondant à la partie du modèle conceptuel indiqué par le rectangle bleu inférieur sur la figure 3.11). L'évolution des états de surface sur sols nus et travaillés est présentée au chapitre 4. Le développement de la végétation spontanée après travail du sol ou désherbage chimique est présenté aux chapitres 5 et 6. Le chapitre 5 présente une étude des structures des communautés d'espèces adventices. La modélisation de la germination et de la croissance des espèces est ensuite présentée au chapitre 6. Le chapitre 7 présente enfin une modélisation de la dynamique de l'infiltrabilité à partir de la représentation de la dynamique des états de surface du sol abordée dans les chapitres 4, 5 et 6.

Cette seconde partie est également composée d'un dernier chapitre (chapitre 8) sur les processus biophysiques qui déterminent indirectement le fonctionnement hydrologique du milieu en modifiant la répartition spatio-temporelle des actions des agriculteurs (rectangle bleu supérieur sur la figure 3.11).

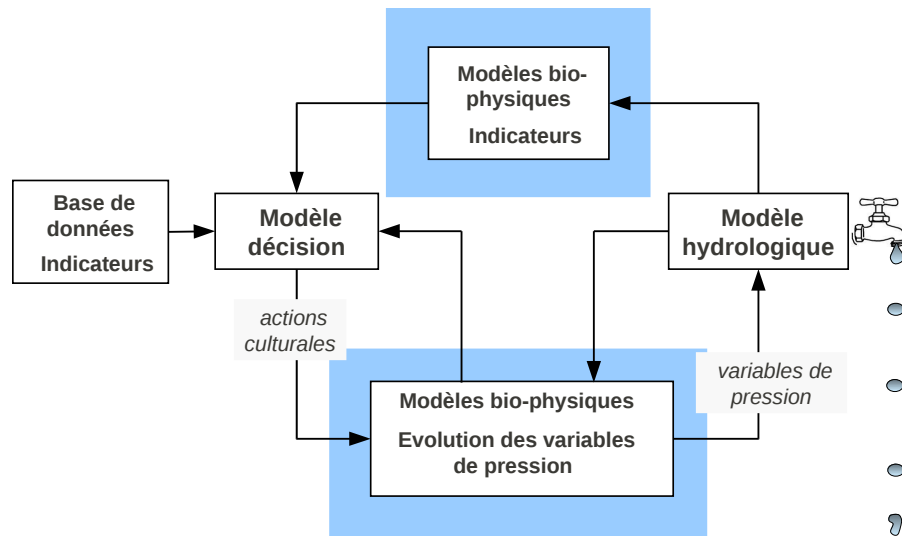


FIGURE 3.11 – La partie du modèle conceptuel traitée dans la partie II (en bleu)

Chapitre 4

Evolution des états de surface sur sols nus et travaillés

Sommaire

4.1	Introduction	137
4.2	Materials and methods	138
4.2.1	Study site	138
4.2.2	Classification of soil surface characteristics	140
4.2.3	Data collection	141
4.2.3.1	Soil surface characteristics	141
4.2.3.2	Rainfall characteristics	141
4.2.3.3	Tillage dates and features	142
4.2.3.4	Basic soil properties	143
4.2.4	Statistical analyses	143
4.2.4.1	The ordinal logistic regression approach	143
4.2.4.2	Checking collinearity among predictor candidates	144
4.2.4.3	Selection of model type and predictor candidates	144
4.2.4.4	Validation	145
4.3	Results and discussion	146
4.3.1	Characteristics of the data set	146
4.3.1.1	Distribution of observations among variable classes	146
4.3.1.2	Collinearity between predictor candidates	147
4.3.2	Selection of the predictor variables	147
4.3.3	Evaluation and comparison of models	149
4.3.4	Examples of SSC predictions over the Roujan catchment	151
4.4	Conclusion	151

Chapitre 4

Evolution des états de surface sur sols nus et travaillés

Article accepté par *Soil and Tillage Research* (publication à venir)

Predicting the spatio-temporal dynamic of soil surface characteristics after tillage
N. Paré, P. Andrieux, X Louchart, A. Biarnès, M. Voltz

4.1 Introduction

Soil surface characteristics (SSC), namely soil cover, topsoil structure and soil crusting (Casenave and Valentin, 1992 ; Leonard and Andrieux, 1998 ; Le Bissonnais et al., 2005) are known to influence the partition of rainfall between infiltration and overland flow (e.g., Auzet and Boiffin, 1995 ; Moussa et al. 2002).

They vary largely in time and space due to many factors, among which soil variation and farming practices are the most effective (Bresson and Boiffin, 1990 ; Earl, 1997 ; Leonard and Andrieux, 1998 ; Sillon, 1999 ; Martin et al., 2004 ; Armand et al., 2009). Knowledge of SSC is therefore essential for predicting hydrological processes at both the field and catchment levels.

Several authors have proposed runoff risk classification schemes based on SSC classification. For example, Casenave and Valentin (1992) related soil runoff capability variation in Western Africa to SSC classes defined by the soil surface vesicular porosity and crusting and the amount of worm casts, whereas Cerdan et al. (2002) related potential values of infiltration capacity to SSC classes corresponding to combinations of soil surface roughness, crop cover and soil crusting stage. These classifications are useful for facilitating the parameterization of topsoil infiltration properties in distributed rainfall/runoff modelling approach (Cerdan et al., 2002). Indeed recognizing SSC variation in space and time at the catchment scale is much faster than measuring the variation of soil infiltration capacities. Nevertheless, field surveys of SSC still remain labor-intensive and costly. An alternative is to use remote sensing techniques. Numerous applications have attempted to map single soil surface attributes, like soil surface crusting (Ben-Dor et al., 2003 ; Goldshleger et al., 2004) or soil surface roughness (Baghdadi et al., 2002). Some have also attempted to map synthetic SSC classes, defined as combinations of soil surface attributes like crust development, topsoil structure, vegetation cover, etc. (Wassenaar et al., 2005 ; Corbane et al., 2008). This approach is promising but is still under development, and it requires fine temporal and spatial image resolutions given the characteristic scales of SSC variation. Another alternative is to develop prediction models of SSC from easily-accessed environmental variables, which would also allow for exploration of prospective scenarios regarding, for example, the effect of changes in agricultural practices on catchment

runoff. This is what this paper is concerned with in the specific case of the prediction of SSC changes due to tillage practices.

Tillage is the agricultural management practice that has the greatest effect on soil structure. Many studies in the literature have observed and quantified the impact of tillage on soil surface conditions (e.g. Boiffin, 1984 ; Xu and Mermoud, 2001) and on soil physical properties (e.g. Ndiaye et al., 2005 ; Chahinian et al., 2006 ; Strudley et al., 2008). These studies have clearly shown that tillage initially increases soil porosity, removes existing soil crusts and thereby increases soil infiltration properties. They have also shown that subsequent rainfalls and wetting-drying cycles favor soil reconsolidation and soil-surface sealing or crusting (Boiffin, 1984). However, only a few studies have attempted to develop prediction models of the effects of tillage and subsequent reconsolidation. Green et al. (2003) provided an overview of the advances in prediction approaches. They concluded that quantitative algorithms for computer simulations are scarce and typically limited to the short-term effects of tillage. To our knowledge, the situation has not improved since Green et al.'s review. Moreover, the rare predictive equations that are available concern only single soil properties, like bulk density, surface roughness or hydraulic conductivity (e.g. Boiffin, 1986 ; Risse et al., 1995) and, therefore, do not allow to predict the simultaneous change of several SSC that occur after tillage.

In this paper, we present and evaluate a prediction approach of the changes in time and space of SSC classes after tillage at the catchment scale. A SSC classification scheme developed by Andrieux et al. (2001) and based on several criteria such as topsoil structure as related to tillage practices or type of soil crust, was used. Given the influence of rainfall and general soil characteristics on the dynamic of soil consolidation after tillage (see Boiffin and Sebillotte, 1976 ; Dexter, 1977 ; Martin, 1999), we assume that the variation of SSC can be empirically predicted by a linear combination of (i) rainfall parameters, being the main drivers of the temporal changes in SSC in a given field, and (ii) basic soil and tillage characteristics, determining the between-field variations in the rates of change. The prediction method we chose is a logistic regression that allows us to estimate the probability of the occurrence of ordered events, which is here the sequence of SSC classes, and can make use of several numeric and categorical predictors. The fit and evaluation of the prediction approach was performed on a data set of SSC observations taken from 2004 to 2007 in a 91-ha catchment in the south of France planted mainly with vineyards.

4.2 Materials and methods

4.2.1 Study site

The study site was the 91-ha Roujan catchment (43°30'N and 3°19'E) about 60 km to the west of Montpellier in the south of France. The climate is of a sub-humid Mediterranean type characterized by a long dry season and high-intensity and short-duration storms that cause Hortonian overland flow ; it has a mean annual rainfall of 650 mm and a mean Penman reference evapotranspiration of 1090 mm (Andrieux et al., 1993). The catchment consists of four distinct geomorphological units (Fig. 4.1a) : a slightly undulating plateau, terraces hillslopes, a colluvial glacis and a central depression. The elevation ranges from 75 m above sea level in the depression to 125 m at the top of the plateau, and the slope from 2% in the depression to about 15-20% on the terraces. The main soils from the top down the slope are, according to local soil classifications (and to WRB 1998) : (i) stony brown calcareous soils (calcaric leptosol) and

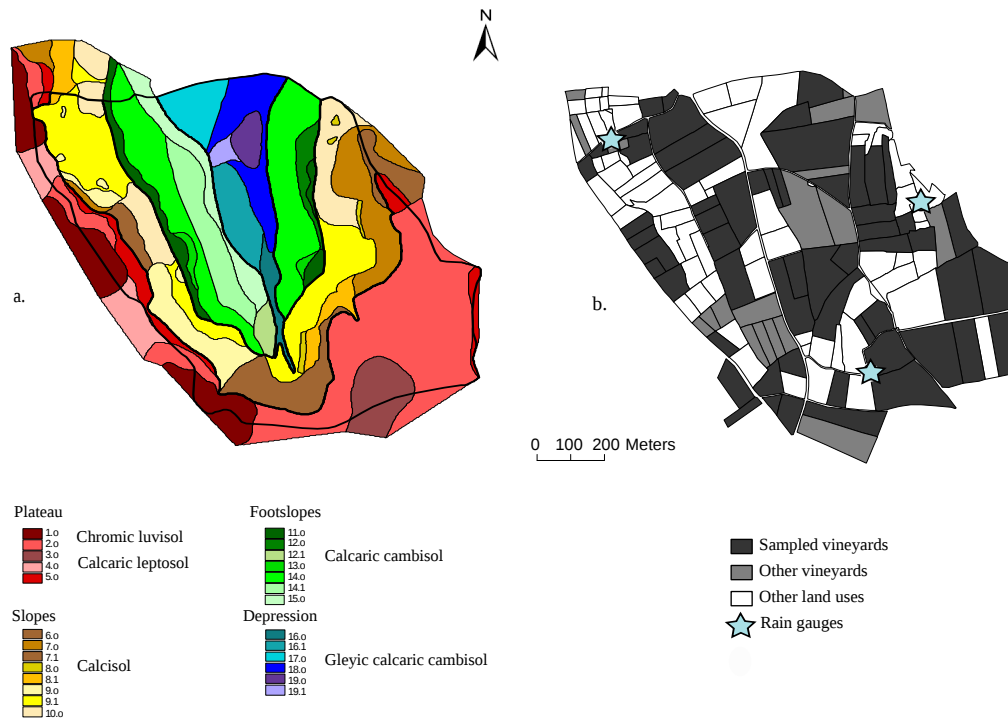


FIGURE 4.1 – Spatial distribution of soil and geomorphological units in the Roujan catchment. b. Sampling design

stony red soils on the plateau (chromic luvisol), (ii) calcareous clay soils (calcisol) on the slopes, (iii) calcareous soils with poorly differentiated profiles and a loamy texture (calcaric cambisol) on the footslopes and (iv) calcareous soils with a medium-to-fine texture with hydromorphic features (gleyic calcaric cambisol) (FAO, 1988) on the depression. Land use in the catchment consists mainly of vineyards. During the monitoring period, vineyards covered 62% of the catchment area on average. The total number of fields in the catchment varied from 153 in 2004 to 147 in 2007, with their area ranging from 0.1 to 2 ha. A dense network of ditches, 11 km long, isolates most fields, collects overland flow, recharges and drains the shallow groundwater and routes water to the catchment outlet. Concerning the agricultural practices, a survey identified three types of soil treatments of the vineyards. In the first one, herbicides are applied over the whole field without any tillage. Consequently, soil surface characteristics remain the same throughout the year. In the other two treatments, herbicides are applied only along the vine rows, whereas the inter-row is tilled one to four times per year or covered permanently with grass. In these last two soil treatments, the soil surface characteristics vary with time due to tillage or changes in the extent of grass cover.

4.2.2 Classification of soil surface characteristics

Here we focus on the description of SSC in the Roujan catchment on the tilled vineyards, which during the study period corresponded to 86% of the vineyards and exhibited a large temporal and spatial variation of SSC. To distinguish between the various SSC that can be observed on the tilled fields, we followed the classification of SSC resulting from a work by Andrieux et al. (2001) on the same site. These authors classified the SSC according to the observed soil cover, topsoil structure and soil crusting and showed that the distinguished classes have different infiltration properties as measured by rainfall simulation. Here we use only the part of the classification describing the SSC in the tilled vineyards. They are represented in Fig. 4.2. They correspond to different stages in the evolution of the soil structure of the vineyard soils due to the effect of tillage and of natural reconsolidation by raindrop impact and redistribution of soil particles by splash and flow (e.g., Robinson and Philips, 2001) :

- (i) The first stage, named “recently tilled” and in short “T,” corresponds to the stage just after tillage when the soil porosity increased, the topsoil structure loosened and the surface crusts if any were destroyed. In the field, this stage is recognized by a fragmentary structure of the soil surface with clods and particles clearly distinguishable and the absence of any crust.
- (ii) The second stage, named “formerly tilled” and in short “TCst,” follows the T stage. It still exhibits a loose topsoil structure but a thin structural crust has formed over at least parts of its surface. In the field, this stage is recognized by a still very rough soil surface that is partially to totally closed with a thin and porous structural crust. Soil clods must remain visible even under the crusted part of the soil surface since at this stage the crust that has formed only covers the soil surface but has not altered significantly the underlying soil structure.
- (iii) The third stage, named “crusted” and in short “Cst,” is the final state of soil reconsolidation after tillage. The topsoil is recompacted and a continuous structural crust with a thickness larger than in the second stage overlays it. In the field, this stage is recognized by a totally closed soil surface with a continuous and consolidated structural crust, a compacted topsoil structure with soil clods that are no longer visible from the surface.

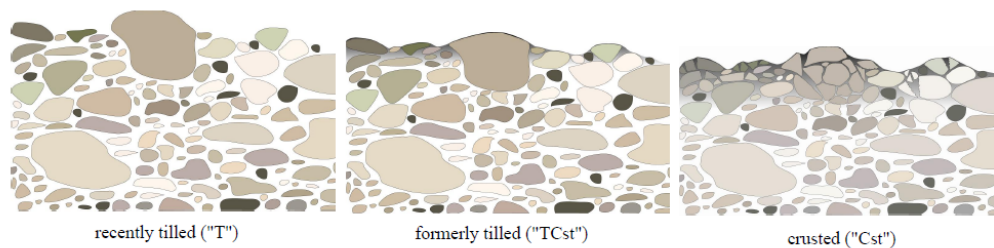


FIGURE 4.2 – The three stages of soil surface evolution after tillage.

The deep-grey shapes portray stones and gravels. Shapes of other colors portray clods. The grey shading that appears between the soil clods indicates the change in extension of the structural crust.

It must be pointed out that variants of the third stage exist. A first variant is related to possible grass growth that partly covers the soil. It was rarely observed during the monitoring periods due to the droughts that limited grass development after tillage. A second one is linked

to sedimentary crusts that form, instead or in addition to structural crusts, in downslope topographical depressions where redeposition of eroded material can occur. However, these crusts are of limited spatial extent in our study area and represent at the most a very small part of the fields (Corbane et al., 2008). Given their rarity, the variants were not considered in our analysis.

4.2.3 Data collection

4.2.3.1 Soil surface characteristics

SSC were monitored on 58 fields of the Roujan catchment, corresponding to almost all of the tilled vineyards (95% of the total area of tilled fields) (Fig. 4.1b). All of them were tilled one or several times during the monitoring period, which lasted from February 2004 to February 2007. Thus, different sequences of SSC evolution after tillage, called tillage sequences, could have been observed for the same field. Observations were made once per month, apart from March to July 2007 when they were made every week. Only the observations within three months after tillage were retained for analysis to focus on the periods of soil reconsolidation. They consisted in examining the four main criteria for determining the SSC class : (i) the presence or absence of surface crusts, (ii) the thickness of the crust if present, (iii) the visibility of soil clods, (iv) the degree of compaction of the topsoil structure as estimated with a knife. Several observations were made in each field in order to identify the major SSC of the tilled inter-rows. It is important to emphasize that all of the staff who did the observations were preliminary trained in the field to recognize the SSC to limit variations in judgment between surveyors as much as possible. SSC monitoring produced a sample of 547 observations from 158 tillage sequences and 58 fields which was submitted to statistical analysis.

4.2.3.2 Rainfall characteristics

Rainfall was recorded by three tipping bucket rain gauges spatially distributed over the catchment (Fig. 4.1b). For each observation field, the reference rainfall measurements were those taken by the nearest rain gauge. For each SSC, two rainfall characteristics were estimated from the rainfall measurements : (i) the cumulative rainfall amount since tillage and (ii) the cumulative kinetic energy of the rainfall since tillage. The cumulative rainfall was directly computed from the rainfall measurements, whereas kinetic energy was calculated by using empirical equations relating rainfall kinetic energy to rainfall intensity Salles et al. (2002)(see review by Salles et al., 2002). Because no single equation is generally recognized to be valid, we chose to test three different equations, as described in Table 4.1.

TABLE 4.1 – Equations relating time-specific kinetic energy (KE_{time}) and rainfall intensities (I) (after Salles et al., 2002) N.B. The third equation is composed of two equations, (3a) and (3b), based on the same approach and with two complementary definition domains.

	Reference	$KE_{time}(J m^{-2} h^{-1}) -$ $I(mm h^{-1})$ relation	Location	Range of I ($mm h^{-1}$)
Eq. (1)	Cerro et al., 1998	$38.4 I (1 - 0.538e^{-0.029I})$	Italy	n.a.
Eq. (2)	Zanchi and Torri, 1980	$I(9.81 + 11.25 \log_{10}I)$	Barcelona, Spain	n.a.
Eq. (3a)	Uson and Ramos, 2001	$23.4I - 18$	NE Spain	$I < 20$
Eq. (3b)	Sempere-Torres et al., 1992	$34I - 190$	Cévennes, France	$20 \leq I \leq 100$

They were all derived from measurements in Mediterranean sites. Let us note that the third equation is a combination of two published equations, one for intensities under 20 mm/h and one for intensities larger than 20 mm/h. For the application of the three equations, rainfall intensities were estimated in time steps of 5 min. This time step was chosen to be as small as possible to avoid overly smoothing the actual rainfall intensities while remaining realistic with regard to the inertia of the tipping bucket rain gauges.

4.2.3.3 Tillage dates and features

Because each SSC observation had to be related to the last tillage, the dates and the characteristics of tillage operations were registered. They were determined from the farmer's statements for the monthly observations and from the SSC observations when they were realized weekly. When there was a large uncertainty on the date and feature of the tillage that preceded an SSC observation, this SSC was not included in the sample. The tillage characteristics that were recorded included the kind of tool used for tillage, the size of the clods created by tillage and the perpendicular roughness created by tillage. The latter two characteristics were measured in the field and classified in three classes, as seen in Table 4.2.

TABLE 4.2 – Distribution of observations among SSC classes and predictor candidates

	Number of observations				Number of fields	Number of sequences
	T	TCst	Cst	Total		
Soil type						
Luvisols	81	49	73	203	23	64
Regosols	42	52	38	132	14	39
Cambisols	80	75	57	212	21	55
Clay level						
< 12.5%	33	46	28	107	12	29
[12.5% ; 22.5%[	111	78	81	270	27	84
≥ 22.5%	59	52	59	170	19	45
Stoniness						
[0% ; 25%[	76	79	49	204	23	52
[25% ; 50%[	64	65	71	200	16	56
[50% ; 100%[	63	32	48	143	19	50
Tillage tool						
Spring-tine cultivator	134	102	105	341	-	101
Rotary cultivator	69	74	63	206	-	57
Roughness after tillage						
< 2cm	41	21	32	94	-	33
[2cm ; 5cm[	145	142	130	417	-	112
≥ 5cm	17	13	6	36	-	13
Clod size after tillage						
< 1cm	18	8	10	36	-	15
[1cm ; 5cm[	113	107	96	316	-	96
≥ 5cm	72	61	62	195	-	47
Total	203	176	168	547	58	158

4.2.3.4 Basic soil properties

Each sampled field was also characterized by the values of some of its permanent soil attributes, namely clay content, stoniness and soil type, which were observed during the soil survey of Roujan (Andrieux et al., 1993) and by visual inspection during the SSC monitoring. Table 4.2 indicates the classes that were distinguished for these soil attributes.

4.2.4 Statistical analyses

An ordinal logistic regression approach was used to analyze the factors controlling the change in SSC and to build a prediction model of the SSC variation within the Roujan catchment. Logistic regression was chosen because it enabled fitting the logarithm of the probability of an event as a linear regression to a set of predictor variables that may be either continuous or categorical. Compared to the standard binary logistic regression, which estimates the probability of one event only, ordinal logistic regression predicts the probability of a given event and of all events that are ordered before it occurs. This corresponds well to the present case, where we sought a model to predict the probability of the occurrence of SSC categories that follow each other in time.

4.2.4.1 The ordinal logistic regression approach

Several ordinal logistic regression models are available, depending on the exact nature of the response and the predictor variables and of their relationships (see the review of Ananth and Kleinbaum, 1997). Here we used the unconstrained partial-proportional odds model, which is presented in detail by Peterson and Harrell (1990). All statistical calculations were made with the R software (Ihaka and Gentleman, 1996), and its VGAM package (Yee, 2008) was used for applying logistic regression.

To describe the principles of the model, let us first start with the proportional odds model of which the model is an extension. Consider a response variable Y with k ordered categories and x , a vector of n predictor variables. The proportional odds model relates the logarithm of the ratio between the probability of the response variable being larger or equal to a given category ($Y \geq j$ with $j = 2, \dots, k$) and the probability of a response smaller than this category to a linear combination of a set of independent predictor variables

$$\ln\left(\frac{P(Y \geq j)}{P(Y < j)}\right) = \alpha_j + x'\beta \quad j = 2, \dots, k \quad (4.1)$$

with α_j being the unknown intercept and β being the vector of n unknown regression coefficients corresponding to x . Because $P(Y > j) + P(Y \leq j) = 1$, Eq (4.1) can be rewritten as

$$\frac{P(Y \geq j)}{1 - P(Y \geq j)} = \exp(\alpha_j + x'\beta) \quad j = 2, \dots, k \quad (4.2)$$

The quotient on the left hand side of Eq. (4.2) is referred to as the odds. Rearranging Eq. (4.2) leads to

$$P(Y \geq j) = \frac{\exp(\alpha_j + x'\beta)}{1 + \exp(\alpha_j + x'\beta)} \quad (4.3)$$

The whole model is composed of $k - 1$ linear equations corresponding to the $k - 1$ probabilities to be predicted and exhibits $(k - 1 + n)$ coefficients. The intercepts α_j vary for each equation and satisfy the condition $\alpha_2 \leq \alpha_3 \leq \dots \leq \alpha_k$. In the proportional odds model, the n β coefficients do not vary between the equations, meaning that the relationship between x and the log-odds ratio for Y is assumed to be independent of the category predicted. This assumption applies to all predictor variables and corresponds to what is called the proportional odds property, which gave its name to the method. If it is not satisfied, which is true in our case study (as will be seen later), one can apply the unconstrained partial-proportional odds model, which permits non-proportional odds for a subset q of the n predictors. The partial-proportional odds model is as follows :

$$P(Y \geq j) = \frac{\exp(\alpha_j + x'\beta + t'\gamma_j)}{1 + \exp(\alpha_j + x'\beta + t'\gamma_j)} \quad (4.4)$$

with t , the vector of q variables out of the n predictor variables for which the proportional odds assumption is not met, and γ_j , the vector of coefficients associated with the q predictor variables. Notice that the γ_j vectors differ following j and that γ_1 coefficients are simply fixed at 0. Consequently, in this model there are still $k - 1$ linear equations, but the number of coefficients to estimate amounts now to $(k - 1) + (k - 2)q + (n - q)$. The unconstrained partial-proportional odds model is therefore much less parsimonious in terms of coefficients to be fitted than the proportional odds model. In the VGAM package of the R software, the coefficients of the model are estimated by maximum likelihood.

In this case study, because the response variable, the SSC, has three classes, the number $k - 1$ of equations to fit was two.

4.2.4.2 Checking collinearity among predictor candidates

To control the absence of multicollinearity between the predictor variables, two measures were carried out. One is the Cramer's V coefficient, which estimates the degree of dependence between two categorical variables (Cramer, 1999) :

$$V = \sqrt{\frac{\chi^2}{l(c - 1)}} \quad (4.5)$$

with χ^2 being the chi-square statistic, l being the total sample size and c being the minimum number of categories of the two categorical variables. The statistic V ranges from 0 (no dependence) to 1 (perfect association). It was preferred to the chi-square measure because it is not sensitive to the sample size. It does not, however, allow us to test whether the estimated collinearity is statistically significant.

Another measure was the Kruskal-Wallis non-parametric test statistic (Kruskal and Wallis, 1952) that estimates the degree of association between a categorical variable and a continuous variable. This statistic follows an approximate χ^2 distribution, which therefore allows estimation of the probability of the null hypothesis, i.e., the absence of association between a couple of categorical and continuous predictors.

4.2.4.3 Selection of model type and predictor candidates

To decide which model type should be used, an unconstrained partial-proportional or proportional odds model and which predictor variables may be assumed to respect the proportional odds property, we used a likelihood ratio test (Peterson and Harrell, 1990). This test

is based on the calculation of the deviance statistic, which estimates the goodness of fit of the logistic model and is defined by :

$$D = -2\ln\left(\frac{\text{Likelihood fitted model}}{\text{Likelihood saturated model}}\right) \quad (4.6)$$

The smaller the deviance, the better the fit of the model compared to the saturated model that contains all main effects and all possible interactions between factors. The test, then, compares the difference in D between the partial-proportional and the proportional odds models, applied with the predictor candidate as the sole predictor, for each predictor candidate. The difference in deviance is chi-square distributed with $(k - 2)$ degrees of freedom under the null hypothesis that there is no difference in the coefficients between the two models, which enables us to estimate its statistical significance.

For upward selection of variables in the ordinal regression models, we used the deviance information criterion (DIC) proposed by Spiegelhalter et al. (2002), which is a Bayesian measure of fit, penalized by an additional term representing model complexity :

$$DIC = \bar{D} + p_D \quad (4.7)$$

with \bar{D} being the mean Bayesian deviance and p_D the effective number of parameters of the model (see Eq. (37) in Spiegelhalter et al. (2002)). Because increasing the number of predictors in the regression model is known to be accompanied by a better fit, the DIC allows us to make a trade-off between improvement of fit and model complexity, represented by the number of free parameters in the model. Thus, at each step of inclusion of an additional predictor, the change in DIC between the $(p-1)$ -predictor model and the p -predictor model was calculated. The additional predictor was retained in the final model if the computed DIC of the model including this predictor was smaller. The significance of a predictor coefficient within each fitted model was assessed with the Wald statistic, W (Hosmer and Lemeshow, 1989),

$$W = \hat{\beta}/s_e(\hat{\beta}) \quad (4.8)$$

which compares the estimated coefficient, $\hat{\beta}$, to an estimate of its standard error, $s_e(\hat{\beta})$. The Wald statistic follows a standard normal distribution under the null assumption that the model coefficient is zero. Lastly, notice that the variables whose distribution exhibited large skewness were square-root transformed, because asymmetric distribution and extreme values caused instability during the parameter estimation. Accordingly, all rainfall variables had to be transformed.

4.2.4.4 Validation

To evaluate the prediction error of the fitted logistic regression models, a cross-validation was applied. The initial data set was randomly divided into two subsets, one corresponding to 90% of the observations and the other corresponding to the remaining 10%. The largest subset was used for fitting the logistic regression models provided by the selection step, and the smallest was used for independent evaluation. This procedure was repeated ten times to estimate the average and standard deviation values of the well-classified rates of SSC. A Wilcoxon signed-rank test (Wilcoxon, 1945) was performed to test the significance of the differences in the performance of the models. As the samples are related and small, we used this non-parametric test to compare averages of well-classified rates. Indeed, the cross-validation

data sets are the same for all models, and there are only 10 values to compute the average rate. With the assumption that the differences between matched-pair values are independent observations from a symmetric distribution, the null hypothesis is that this distribution has a median of zero. The Wilcoxon signed-rank statistics W_+ is defined as :

$$W_+ = \sum_{i=1}^n \phi_i R_i \quad (4.9)$$

considering n well-classified rates computed with a model, for $i = 1, \dots, n$, X_i and Y_i are two rates computed on the same data set i and $Z_i = Y_i - X_i$. R_i is the rank of the absolute value $|Z_i|$ and ϕ_i is the sign of Z_i .

4.3 Results and discussion

4.3.1 Characteristics of the data set

4.3.1.1 Distribution of observations among variable classes

The distribution is well-balanced between the SSC classes, which reflects that the majority of the observed tillage-reconsolidation periods included all of the stages of soil surface characteristics (Table 4.2). The distribution is well-balanced between the SSC classes, which reflects that the majority of the observed tillage-reconsolidation periods included all of the stages of soil surface characteristics. In contrast, the soil and tillage variables, with the exception of stoniness and soil type, showed a strongly unbalanced distribution of observations between their classes. Concerning clay content, this is linked to the textural characteristics of the soils of the study zone, which mostly exhibit a medium clay content. Concerning the tillage-related variables, the dominance of one class is due to similar choices of tillage practices made by a majority of the farmers of the study site; they tilled their fields with the same kind of tool and in similar soil wetness conditions.

TABLE 4.3 – Distribution of two rainfall variables among the three soil surface characteristics stages

		T	TCst	Cst
Cumulative rainfall amount since tillage (mm)	Minimum	0	8	32
	Lower quartile	0	37	75
	Median	1	54	92
	Upper quartile	2	60	123
	Maximum	30	121	256
Cumulative kinetic energy since tillage as computed by Eq. (2) (J m ⁻²)	Minimum	0	165	1116
	Lower quartile	0	1003	2048
	Median	7	1150	2968
	Upper quartile	32	1288	4025
	Maximum	807	3922	7348

Table 4.3 shows that the median and the range of values of cumulative rainfall and kinetic

energy since tillage is very different between the SSC classes, which confirms the major influence of rainfall on the evolution of soil surface characteristics after tillage. As expected, SSC T was observed when the cumulative rainfall since tillage remained small, whereas SSC Cst was observed with much larger rainfalls and SSC TCst with intermediate values.

4.3.1.2 Collinearity between predictor candidates

When applying logistic regression analysis, the absence of multicollinearity between variables is desirable. Collinearities between rainfall and soil and tillage variables were shown to be insignificant by the Kruskal-Wallis test. This was expected because the observed latter variables are intrinsic soil and tillage properties. In contrast, the associations between pairs of soil and tillage parameters appear variable, as seen in Table 4.4, which presents the Cramer's coefficients. It is possible to distinguish roughly two degrees of associations.

TABLE 4.4 – Cramer coefficients of the associations between the categorical predictor candidates

	Soil type	Clay level	Stoniness	Tillage tool	Roughness	Clod size
Soil type	-	-	-	-	-	-
Clay level	0.29	-	-	-	-	-
Stoniness	0.62	0.29	-	-	-	-
Tillage tool	0.30	0.37	0.27	-	-	-
Roughness	0.21	0.16	0.25	0.52	-	-
Clod size	0.27	0.25	0.21	0.45	0.36	-

Three pairs of variables (tillage tool-perpendicular roughness, tillage tool-clod size and stoniness-soil type) have coefficients close to or larger than 0.5, which indicates a strong association. The existence of an association between the tillage tool and the perpendicular roughness and clod size is logical because the type of tillage tool determines the latter two soil characteristics. Furthermore, the strong association between stoniness and soil type can be explained by the fact that there is a large variation in stoniness between the soil types, with stoniness being large for the chromic luvisols that occur on the plateau of the Roujan catchment and almost negligible for the other soil types (Andrieux et al., 1993).

All of the other pairs show small or very moderate association, with their Cramer's coefficients ranging from 0.16 to 0.37. Soil characteristics, namely stoniness, soil type and clay content seem to have little influence on the choice of the tillage tool and thereby on the resulting soil roughness and clod size.

Eventually, it must be noticed that in the prediction models presented hereafter, we avoided the presence of too strongly associated variables among the set of predictors to avoid undesired effects due to multicollinearity. If one variable of each of the three pairs exhibiting strong association was included in the model, the other was not.

4.3.2 Selection of the predictor variables

The results of the test of proportional odds properties are given in Table 4.5. For the sake of parsimony in the number of model parameters, we considered that the proportional odds property was rejected for a predictor only when the probability of the null hypothesis was smaller than 0.01. Consequently, stoniness and soil type were assumed to require different coefficients for predicting different classes of SSC. Thus, the fit of a fully proportional odds

model was inappropriate, and an unconstrained partial-proportional model was used in the following analysis.

TABLE 4.5 – Values (D) of the likelihood ratio test of the proportional odds property of each predictor candidate

	D
Cumulative rainfall amount since tillage	0.512
Cumulative kinetic energy since tillage as computed by	
Eq. (1)	1.000
Eq. (2)	5.525*
Eq. (3)	1.585
Soil type	6.677**
Clay level	0.334
Stoniness	10.833***
Tillage tool	1.955
Perpendicular roughness	4.977*
Clod size	0.100

Table 4.6 presents the results of the upward selection of predictors. The restriction mentioned in the previous section about the associated predictor candidates was taken into account. Moreover, as can be seen, four competing ordinal logistic regression models were fitted in order to analyze which of the four rainfall variables (cumulative rainfall and the three estimates of cumulative kinetic energy) was the best predictor of the influence of rainfall on SSC changes. Indeed, all of the four rainfall-related variables are closely correlated and thus cannot be introduced simultaneously as predictors in the regression. In

all four models, the order of inclusion of predictors was the same. Starting from the most significant predictor, we had first the rainfall variable, then successively stoniness, perpendicular roughness, clay content and, finally, clod size. Only the introduction of the first three led to an improved DIC. This decrease in the value of the DIC was large for the rainfall and stoniness predictors but very small for perpendicular roughness. We discuss hereafter the result of the selection for each predictor variable.

TABLE 4.6 – Deviance Information Criterion at each step of the upward selection of variables
N.B. Model A used cumulative rainfall amount since tillage and Models B used cumulative kinetic energy since tillage as computed by Eq. (1) for Model B1, Eq. (2) for model B2 and Eq. (3) for Model B3

Variables added at each step with upward selection	Step 1 : rainfall variable	Step 2 : stoniness	Step 3 : roughness	Step 4 : clay level	Step 5 : clod size
Model A	357.1	335.0	334.8	335.6	337.6
Model B1	338.4	321.0	321.0	322.1	323.9
Model B2	363.7	347.9	347.7	349.2	350.4
Model B3	339.7	321.7	321.1	322.6	324.2

Rainfall is indeed known as the main driving factor of soil surface changes after tillage. Processes like aggregate slaking and dispersion upon wetting and particle displacement due to raindrop impact and surface runoff favor the formation of soil crusts and decrease soil roughness (e.g., Boiffin and Sebillotte, 1976 ; Dexter, 1977 ; Boiffin, 1984 ; Martin, 1999).

The influence of stoniness on soil crusting and topsoil structure dynamics has been less studied, but several authors (e.g., van Wesemael et al., 1996 ; Robinson and Woodun, 2008) showed that stones modify the dynamic of soil surface changes. As in our study, when site

stoniness is highly variable between fields, it appears as a significant variable for predicting the variation of SSC in time and space.

Soil roughness was shown to slow down the soil crusting process. As explained by Govers et al. (2000), increasing roughness leads to a decrease in the impact of the kinetic energy of rainfall because the impact is distributed on a larger surface and reduced in the direction normal to the soil surface by local slope. However, the two predictor candidates related to soil roughness, perpendicular roughness and clod size, showed very little or no decrease in *DIC*. This may be for two reasons. First, the first two selected predictors already explain a large part of the variation in SSC ; second, the variability of roughness is rather small, because almost 80% of the perpendicular roughness and 60% of clod sizes belonged to one class (Table 4.2).

Clay content was also not considered to be a useful predictor. This is in contrast to different studies that showed its role in the stability of soil aggregates : for high clay contents, soils exhibit stable aggregates and limited crusting (Kemper and Koch, 1966 ; Moldenhauer and Kemper, 1969). Ben Hur et al. (1985) have proposed 20% as a threshold of clay content. Because the clay content of our study site varied from values well below to well above this threshold, it was a relevant predictor candidate for predicting SSC changes. However, on our study site, the fields with high clay content are also stony. Consequently, because stoniness was selected before clay content in the upward selection approach, the latter variable did not bring enough additional information.

To conclude, given the results obtained, the same set of predictor variables was kept for all models, with the first two variables producing a significant decrease of the DIC : cumulative rainfall or kinetic energy and soil stoniness.

4.3.3 Evaluation and comparison of models

The statistics of the well-classified SSC classes, i.e. average value and standard deviation of the proportion of predicted SSC belonging to the correct SSC class, by each of the four competing models are given in Table 4.7, as obtained by cross-validation. No matter which model was used, the performance of the predictions was high and similar among the models : the average well-classified proportion varied from 0.89 to 0.90 and its standard deviation was always small. To test whether the differences of proportions were statistically significant, we computed a Wilcoxon-Mann-Whitney statistic between all of the pairs of well-classified rates. They were all larger than 0.1 , which suggests that the differences were not significant at a 10% probability level.

Consequently, it follows that using only cumulated rainfall as a predictor performs as well as using cumulative rainfall kinetic energy. From a theoretical point of view, this was unexpected, because rainfall intensity is generally assumed to better explain the change in SSC than just the rainfall amount. However, in our case study, there was a good linear relationship between the cumulative kinetic energy and the cumulative rainfall, which indicates that the relationship between the rainfall amount and the rainfall intensity did not vary much among all observed rainfalls, regardless of their heights. Thus, in this instance, it was practically impossible to discriminate

TABLE 4.7 – Average rates and standard deviations of SSC well-classified computed from the 10 cross-validation data sets for the four models

	Well-classified rate	
	Average	Std. Dev.
Model A	0.9035	0.0407
Model B1	0.9053	0.0343
Model B2	0.8980	0.0342
Model B3	0.9035	0.0347

between the prediction performance of the rainfall amount and the rainfall kinetic energy. We can also point out that the choice of an equation for computing kinetic energy from rainfall energy was not essential with respect to the prediction performance.

In the following, a more detailed analysis of model fit and model performance is provided for only one of the four competing models, namely model B2 in Table 4.7, because no significant difference was found between them. Although the rainfall kinetic energy did not allow a significantly better prediction than the rainfall amount in our particular case study, model B2 was preferred in the following analysis because it should theoretically be more predictive if rainfall amount and rainfall intensity are not related. According to the test of the proportional odds property, non-proportional odds for stoniness and proportional odds for kinetic energy were used.

TABLE 4.8 – Coefficient estimates and their standard deviations for the Model B2

	Coefficient estimates	Std. Dev.	Wald Chi-square	p-value
Intercept for logit($P[Y \geq \text{TCst}]$)	-4.68683	0.684879	46.8306	<0.0001
Intercept for logit($P[Y \geq \text{Cst}]$)	-11.98542	0.912595	172.4846	<0.0001
Cumulative kinetic energy since tillage	0.24060	0.016454	213.8093	<0.0001
Stoniness for logit($P[Y \geq \text{TCst}]$)	0.12464	0.286040	0.1899	0.6629
Stoniness for logit($P[Y \geq \text{Cst}]$)	1.02480	0.238396	18.4791	<0.0001

The estimated coefficients of model B2 and their statistical significance are given in Table 4.8. As expected, cumulative kinetic energy is a highly significant predictor and, according to the value of its coefficient in the fitted logistic regression equation, the larger its value, the larger the probability of the occurrence of TCst and Cst. It must also be pointed out that its standard error of estimation is very small. Besides, stoniness is a significant predictor for Cst, the last stage of change in SSC after tillage. Moreover, the coefficient of stoniness is positive, indicating that the evolution of SSC is faster with increasing stoniness. This is consistent with the observation of Robinson and Woodun (2008) who have indicated that, although stones protect a significant proportion of the soil surface from rainfall impact (see also van Wesemael et al., 1996), stones tend to accentuate the development of surface crusts on the areas of soil between them. However, this mechanism seems not to be effective on the early changes in SSC after tillage, because stoniness is not a significant predictor for TCst, the first stage of soil reconsolidation after tillage.

TABLE 4.9 – Average proportions and standard deviations of SSC well-classified computed from the ten cross-validation data sets for the three soil types of the study zone for the Model B2

	Average	Std.Dev.
Cambisols	0.8888	0.07
Regosols	0.9355	0.06
Luvisols	0.8812	0.07

This confirms that the fitted logistic regression model is quite robust among different soil types.

To further evaluate the performance characteristics of the logistic regression fitted model, we also examined from the cross-validation results of Model B2 how the prediction errors varied between the SSC and between the soil types. Table 4.9 shows the differences between the rates of well-classified SSC between the soil types. The differences are minor, and a Wilcoxon signed-rank test indicated that they were not statistically sig-

4.3.4 Examples of SSC predictions over the Roujan catchment

To show an application of the fitted ordinal logistic regression of SSC, we used it to predict the spatial variation of SSC over the vineyard fields of the Roujan catchment at two dates within the period where the farmers usually till their soil, namely from March to June. Figures 4.3a and b shows the dates of tillage and the rainfall distribution during this period, whereas Figures 4.3c and e shows the maps for the distribution of SSC having the largest probabilities of occurrence on two dates. On May 30th there is a large variation of the SSC due to the difference in tillage dates between the fields. As a result, a large variability of the runoff-infiltration processes can be expected at the catchment scale. On the contrary, on June 19th the SSC are uniform over the catchment because the rainfall amounts since tillage were sufficient on all of the fields to lead them to the last stage of soil surface reconsolidation, a fully crusted soil surface. Given a classification of SSC according to their infiltration properties, the predicted maps allow us to simulate the influence of the temporal variation of SSC due to tillage and subsequent reconsolidation on the hydrological behavior of the catchment. Because logistic regression predicts probabilities of occurrence, it is also possible to create uncertainty maps of the SSC, as shown in Figures 4.3d and f. These uncertainty maps can be used in a Monte-Carlo approach to estimate the uncertainty of the hydrological model predictions based on the predicted SSC maps.

4.4 Conclusion

The logistic regression approach developed in this work clearly shows that it is possible to accurately predict the rate of change in SSC after tillage at a given field from the knowledge of a limited number of easily accessed climatic and soil variables. It also provides indications of the variables that are the most significant predictors of SSC changes. Rainfall, represented either by its height or by its cumulated kinetic energy, appears to be the main predicting factor of soil reconsolidation. Moreover, it is the sole significant predictor of the first change that occurs after tillage, from the fresh tillage stage to the first stage of crusting. Only during the second change, consisting of a thickening of the structural surface crust from “TCst” to “Cst,” do other environmental variables become significant predictors. Here, stoniness is the main predictor, as it accelerates the crusting process. Next is the perpendicular roughness of the soil surface, whose influence is small.

The logistic regression approach as an unconstrained partial-proportional odds model proves to be a very flexible prediction model of SSC change because it can make simultaneous use of numeric and categorical predictors and allows the fitting of different coefficients for the different subsequent SSC stages. Consequently, we believe it can be used successfully in other study zones with different climates and soils. To implement it will certainly require in part a re-examination of the most relevant predicting variables. Obviously, rainfall should remain as the main predictor, but the soil and agricultural practice factors may change according to the specific soil variation and the kind of tillage tools used in the study area.

Finally, it must be noticed that this study focused on the spring and summer periods during which the fields are regularly tilled and SSC changes are mainly due to soil reconsolidation and crusting. During the autumn and winter periods, the processes of crusting and weed development occur simultaneously. Thus, to be able to predict the SSC evolution at an annual scale, it will be necessary to consider weed growth variables as additional predictors.

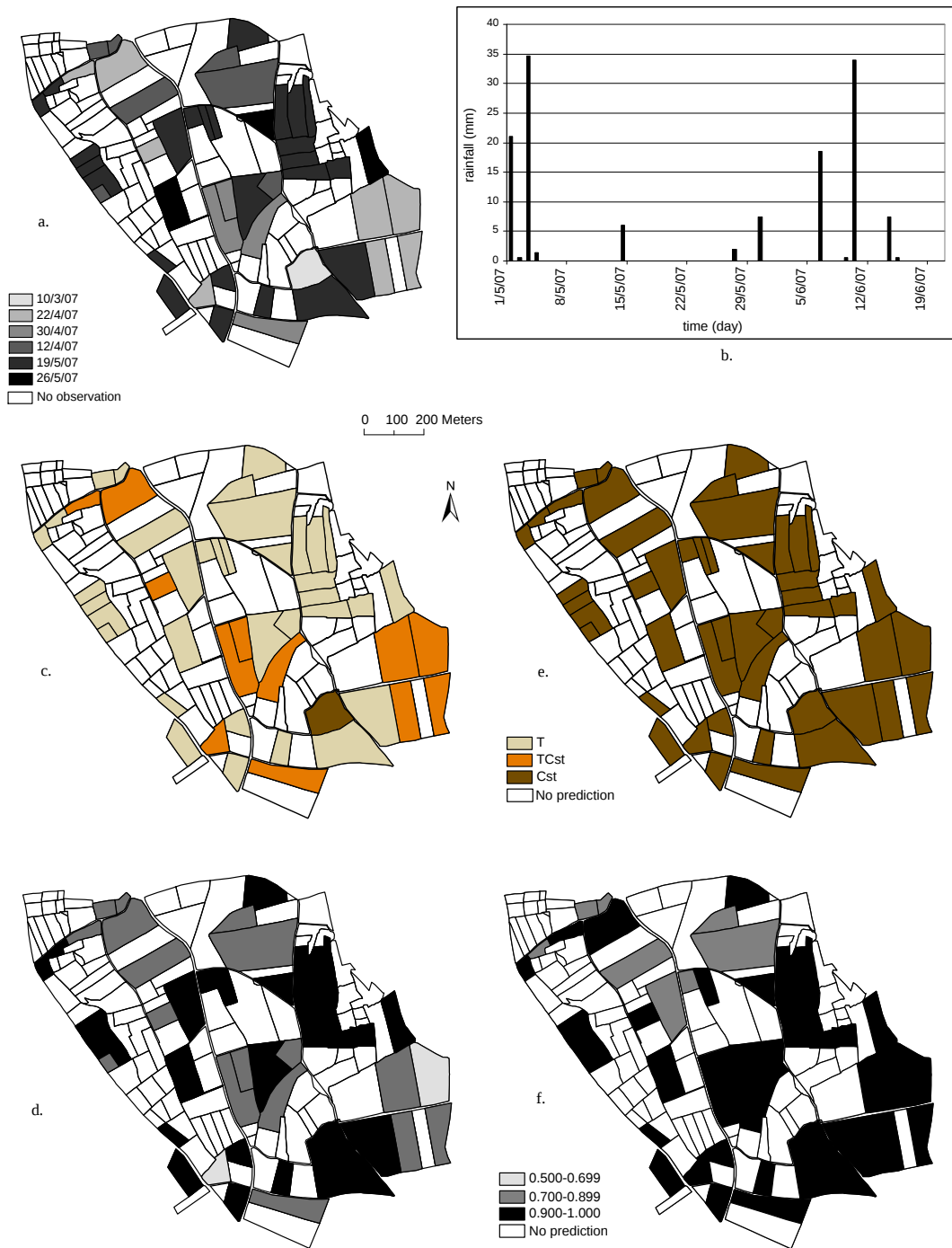


FIGURE 4.3 – Results of the model at two dates : May, 30th 2007 and June, 19th 2007. a. Dates of tillages for each plot. b. Rainfall between June, 1st and June, 19th. c. Soil surface characteristics predicted by the model on May, 30th. d. Probabilities associated to the prediction on May, 30th. e. Soil surface characteristics predicted by the model on June, 19th. f. Probabilities associated to the prediction on June, 19th.

Remerciements

Merci à tous ceux qui ont participé aux relevés d'états de surface utilisés dans ce travail : Jean-Luc Belotti, François Garnier, Gwenn Trotoux, Olivier Huttel, Goulvena Hello et Emmanuel Latge. Merci à Jean-Pierre Vila, Matthieu Hanf, Philippe Besse, Stéphane Robin, Jean-Jacques Daudin et Jean-Stéphane Bailly pour leur appui statistique à différentes étapes de ce travail. Merci à Christian Salles pour ses conseils sur les équations de calcul de l'énergie cinétique. Merci à Yves Blanca pour la réalisation de la figure 4.2. Merci à Nicolas Devaux pour l'aide à la réalisation des cartes. Merci aux co-auteurs de l'article et particulièrement à Patrick Andrieux qui a encadré ce travail et à Marc Voltz pour l'appui rédactionnel.

Bibliographie

- Ananth, C. and Kleinbaum, D. (1997). Regression models for ordinal responses : A review of methods and applications. *International Journal of Epidemiology*, 26(6) :1323–1333.
- Andrieux, P., Bouzigues, R., Joseph, C., Bourlet, M., Lagacherie, P., and Voltz, M. (1993). Le bassin versant de roujan. caractéristiques générales du milieu. Technical report, INRA Science du Sol, Montpellier.
- Andrieux, P., Hatier, A., Asseline, J., de Noni, G., and Voltz, M. (2001). Predicting infiltration rates by classifying soil surface features in a mediterranean wine-growing area. In *International symposium on the significance of soil surface characteristics in soil erosion, COST 623 « Soil erosion and global change » workshop*, Strasbourg, France.
- Armand, R., Bockstaller, C., Auzet, A., and Dijk, P. V. (2009). Runoff generation related to intra-field soil surface characteristics variability application to conservation tillage context. *Soil & Tillage Research*, 102(1) :27–37.
- Auzet, A., Boiffin, J., and Ludwig, B. (1995). Concentrated flow erosion in cultivated catchments : Influence of soil surface state. *Earth Surface Processes and Landforms*, 20(8) :759–767.
- Baghdadi, N., King, C., Bourguignon, A., and Remond, A. (2002). Potential of ERS and radarsat data for surface roughness monitoring over bare agricultural fields : application to catchments in northern france. *International Journal of Remote Sensing*, 23(17) :3427–3442.
- Ben-Dor, E., Goldshleger, N., Benyamini, Y., Agassi, M., and Blumberg, D. (2003). The spectral reflectance properties of soil structural crusts in the 1.2- to 2.5- μ m spectral region. *Soil Science Society of America Journal*, 67(1) :289–299.
- Benhur, M., Shainberg, I., Bakker, D., and Keren, R. (1985). Effect of soil texture and caco3 content on water infiltration in crusted soil as related to water salinity. *Irrigation Science*, 6(4) :281–294.
- Bissonnais, Y. L., Cerdan, O., Lecomte, V., Benkhadra, H., Souchere, V., and Martin, P. (2005). Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion. *Catena*, 62(2-3) :111–124.
- Boiffin, J. (1984). *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*. PhD thesis, INA P-G.
- Boiffin, J. (1986). Stages and time-dependency of soil crusting. In *Assessment of Soil Surface Sealing and Crusting. Proceeding of the symposium*, page 91–98, Ghent, Belgium. Callebaut, F., Gabriels, D., De Boodt, M. (eds.).

- Boiffin, J. and Sebillotte, M. (1976). Climate, structure stability and structure weathering - attempt to analyze a soil behavior in field. *Annales Agronomiques*, 27(3) :295–325.
- Bresson, L. and Boiffin, J. (1990). Morphological characterization of soil crust development stages on an experimental field. *Geoderma*, 47(3-4) :301–325.
- Casenave, A. and Valentin, C. (1992). A runoff capability classification-system based on surface-features criteria in semiarid areas of west africa. *Journal of Hydrology*, 130(1-4) :231–249.
- Cerdan, O., Souchere, V., Lecomte, V., Couturier, A., and Bissonnais, Y. L. (2002). Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff model : Sealing and transfer by runoff and erosion related to agricultural management. *Catena*, 46(2-3) :189–205.
- Cerro, C., Bech, J., Codina, B., and Lorente, J. (1998). Modeling rain erosivity using disdrometric techniques. *Soil Science Society of America Journal*, 62(3) :731–735.
- Chahinian, N., Moussa, R., Andrieux, P., and Voltz, M. (2006). Accounting for temporal variation in soil hydrological properties when simulating surface runoff on tilled plots. *Journal of Hydrology*, 326(1-4) :135–152.
- Corbane, C., Andrieux, P., Voltz, M., Chadoeuf, J., Albergel, J., Robbez-Masson, J., and Zante, P. (2008). Assessing the variability of soil surface characteristics in row-cropped fields : The case of mediterranean vineyards in southern france. *Catena*, 72(1) :79–90.
- Cramer, H. (1999). *Mathematical methods of statistics*. Princeton university press edition.
- Dexter, A. (1977). Effect of rainfall on surface micro-relief of tilled soil. *Journal of Terramechanics*, 14(1) :11–22.
- Earl, R. (1997). Prediction of trafficability and workability from soil moisture deficit. *Soil & Tillage Research*, 40(3-4) :155–168.
- FAO (1988). FAO-UNESCO soil map of the world. revised legend.
- Goldshleger, N., Ben-Dor, E., Benyamini, Y., and Agassi, M. (2004). Soil reflectance as a tool for assessing physical crust arrangement of four typical soils in israel. *Soil Science*, 169(10) :677–687.
- Govers, G., Takken, I., and Helming, K. (2000). Soil roughness and overland flow. *Agronomie*, 20(2) :131–146.
- Green, T., Ahuja, L., and Benjamin, J. (2003). Advances and challenges in predicting agricultural management effects on soil hydraulic properties. *Geoderma*, 116(1-2) :3–27.
- Hosmer, D. and Lemeshow, S. (1989). *Applied logistic regression*. New York, wiley edition.
- Ihaka, R. and Gentleman, R. (1996). R : A language for data analysis and graphics. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 5(3) :299–314.
- Kemper, W. and Koch, E. (1966). Aggregate stability of soils from western united states and canada. *Colorado Agricultural Experiment Station Bulletin*, 1355 :1–52.

- Kruskal, W. and Wallis, A. (1952). Use of ranks in one-criterion analysis of variance. *Journal of the American Statistical Association*, 47(260) :583–621.
- Leonard, J. and Andrieux, P. (1998). Infiltration characteristics of soils in mediterranean vineyards in southern france. *Catena*, 32(3-4) :209–223.
- Martin, P., Joannon, A., Souchere, V., and Papy, F. (2004). Management of soil surface characteristics for soil and water conservation : The case of a silty loam region (Pays de caux, france). *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(9) :1105–1115.
- Moldenhauer, W. and Kemper, W. (1969). Interdependance of water drop energy and clod size on infiltration and clod stability. *Soil Science Society of America Proceedings*, 33 :297–301.
- Moussa, R., Voltz, M., and Andrieux, P. (2002). Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood events. *Hydrological Processes*, 16(2) :393–412.
- Ndiaye, B., Esteves, M., Vandervaere, J., Lapetite, J., and Vauclin, M. (2005). Effect of rainfall and tillage direction on the evolution of surface crusts, soil hydraulic properties and runoff generation for a sandy loam soil. *Journal of Hydrology*, 307(1-4) :294–311.
- Peterson, B. and Harrell, F. (1990). Partial proportional odds models for ordinal response variables. *Applied Statistics-Journal of the Royal Statistical Society Series C*, 39(2) :205–217.
- Risse, L., Nearing, M., and Zhang, X. (1995). Variability in green-ampt effective hydraulic conductivity under fallow conditions. *Journal of Hydrology*, 169(1-4) :1–24.
- Robinson, D. and Phillips, C. (2001). Crust development in relation to vegetation and agricultural practice on erosion susceptible, dispersive clay soils from central and southern italy. *Soil & Tillage Research*, 60(1-2) :1–9.
- Robinson, D. and Woodun, J. (2008). An experimental study of crust development on chalk downland soils and their impact on runoff and erosion. *European Journal of Soil Science*, 59(4) :784–798.
- Salles, C., Poesen, J., and Sempere-Torres, D. (2002). Kinetic energy of rain and its functional relationship with intensity. *Journal of Hydrology*, 257(1-4) :256–270.
- Sempere-Torres, D., Salles, C., Creutin, J., and Delrieu, G. (1992). Quantification of soil detachment by raindrop impact : performances of classical formulae of kinetic energy in mediterranean storms. In *Erosion and sediment transport monitoring programmes in river basins*, pages 115–124. Bogen, J., Walling, D.E., Day, T. (Eds.), Oslo, IAHS publ. no 210 edition.
- Sillon, J. (1999). *Etude expérimentale et modélisation des effets de la structure de la couche labourée sur le régime hydrique du sol nu en phase de dessèchement. Application à la prévision des jours disponibles*. PhD thesis, INA P-G, Paris.
- Spiegelhalter, D., Best, N., Carlin, B., and van der Linde, A. (2002). Bayesian measures of model complexity and fit. *Journal of the Royal Statistical Society Series B-Statistical*, 64 :583–616.

- Strudley, M., Green, T., and Ascough, J. (2008). Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time : State of the science. *Soil & Tillage Research*, 99(1) :4–48.
- Usón, A. and Ramos, M. (2001). An improved rainfall erosivity index obtained from experimental interrill soil losses in soils with a mediterranean climate. *Catena*, 43(4) :293–305.
- vanWesemael, B., Poesen, J., deFigueiredo, T., and Govers, G. (1996). Surface roughness evolution of soils containing rock fragments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21(5) :399–411.
- Wassenaar, T., Andrieux, P., Baret, F., and Robbez-Masson, J. (2005). Soil surface infiltration capacity classification based on the bi-directional reflectance distribution function sampled by aerial photographs. the case of vineyards in a mediterranean area. *Catena*, 62(2-3) :94–110.
- Wilcoxon, F. (1945). Individual comparisons by ranking methods. *Biometrics*, 1 :80–83.
- Xu, D. and Mermoud, A. (2001). Topsoil properties as affected by tillage practices in north china. *Soil & Tillage Research*, 60(1-2) :11–19.
- Yee, T. (2008). The VGAM package. *R News*, 8 :28–39.
- Zanchi, C. and Torri, D. (1980). Evaluation of rainfall energy in central italy. In *Assessment of Erosion*, pages 133–142. De Boodt, M., Gabriels, D. (Eds.), Toronto, wiley edition.

Chapitre 5

Développement de la végétation spontanée après travail du sol ou désherbage chimique : I Structure des communautés d'espèces adventices

Sommaire

5.1	Introduction du chapitre	161
5.2	Effet de facteurs agro-pédologiques sur la distribution spatiale des espèces	162
5.2.1	Introduction	162
5.2.2	Matériel et méthodes	162
5.2.2.1	Méthode d'échantillonnage	162
5.2.2.2	Méthode d'échantillonnage pour les relevés floristiques	164
5.2.2.3	Traitement des données et analyses statistiques pour l'étude des communautés	164
5.2.3	Résultats	167
5.2.3.1	Effet de la saison	167
5.2.3.2	Effet de l'entretien du sol	169
5.2.3.3	Effet du type de sol	171
5.2.3.4	Les espèces majoritaires selon les croisements entretien du sol - type de sol	173
5.2.4	Discussion et conclusion	174
5.3	Evolution temporelle des communautés floristiques des agrosystèmes . . .	175
5.3.1	Introduction	175
5.3.2	Matériel et méthodes	175
5.3.2.1	Protocole des relevés floristiques réalisés en 1979	175
5.3.2.2	Les modes d'entretien du sol en 1979	176
5.3.2.3	Méthode de comparaison des relevés floristiques	176
5.3.3	Résultats	177
5.3.3.1	Coefficients de rémanence et coefficients de transformation (tableau 5.4)	177
5.3.3.2	Fréquences et abondances des espèces rémanentes	177
5.3.3.3	La transformation des communautés	179
5.3.4	Discussion et conclusion	179
5.4	Conclusion sur la structure des communautés d'espèces adventices	180

Chapitre 5

Développement de la végétation spontanée après travail du sol ou désherbage chimique : I Structure des communautés d'espèces adventices

5.1 Introduction du chapitre

L'infiltrabilité de la surface d'un sol dépend notamment de sa couverture herbacée (Albergel et al., 1985), qui augmente en règle générale la capacité d'infiltration du sol par son effet positif sur la structure porale du sol. Cet effet dépend naturellement de l'importance de la couverture herbacée et de sa nature. L'organisation en rangées des vignes et la structure spatiale de la plante induit une faible couverture du sol par la plante cultivée. Le sol y est susceptible de présenter une couverture herbacée importante, qui présente dans les zones méridionales un risque de concurrence hydrique avec la vigne durant sa phase végétative (de mars à septembre). Deux stratégies de gestion du couvert herbacé existent.

L'une favorise le développement du couvert dans des situations et des périodes où l'enherbement participe à la gestion du sol (amélioration de ses propriétés physiques) et ne provoque pas de concurrence trop importante. L'enherbement est alors favorisé en autorisant le développement d'une couverture herbacée naturelle ou par semis d'espèces choisies. Dans les deux cas l'enherbement n'est pas nécessairement permanent car le viticulteur peut être amené à le supprimer par travail du sol ou par désherbage chimique en cas d'apparition d'une concurrence hydrique trop forte.

Une deuxième stratégie est la destruction systématique de tout enherbement naturel afin d'éviter toute possibilité de concurrence. Dans ce cas les destructions s'opèrent tout au long du cycle soit lors des périodes de concurrence, soit parce que des opérations qui ont d'autres objectifs (comme décompacter le sol par exemple) nécessitent une telle destruction. Par conséquent, les couverts herbacés des parcelles viticoles non volontairement enherbées sont très variables (nature des espèces, recouvrement ...) dans le temps selon des cycles de «destruction - pousse». Cette variabilité est également spatiale du fait de la coexistence de différentes modalités d'entretien du sol à l'intérieur d'une même parcelle (rangs, inter-rangs) et donc de gestions différentes du couvert herbacé (moyens de destruction, dates d'intervention).

Ainsi, du fait de stratégies d'entretien du sol et de caractéristiques parcellaires variables, les caractéristiques des couvertures herbacées des parcelles viticoles peuvent être fortement hétérogènes dans l'espace et le temps. Il importe de pouvoir déterminer la dynamique spatiale

et temporelle de ces couverts herbacés pour évaluer la variabilité résultante de l'infiltrabilité du sol à l'échelle d'un territoire viticole. Dans cet objectif, nous avons analysé dans une première phase la structure des communautés d'adventices afin de pouvoir dans une deuxième phase développer une modélisation ad hoc de leur germination et de leur croissance à la suite des opérations de destruction. En effet, un couvert herbacé est composé de différentes espèces et sa composition floristique peut varier dans l'espace et dans le temps. Il est donc nécessaire d'étudier, préalablement à la représentation de sa dynamique, comment est structuré ce couvert herbacé. Pour ce faire, nous avons procédé (i) à une étude spatiale pour évaluer l'effet des modes d'entretien du sol et des types de sol sur les compositions à l'échelle d'ensemble de parcelles viticoles et d'un cycle cultural; puis (ii) à l'analyse de la stabilité des compositions floristiques sur le long terme en comparant nos observations à des observations réalisées il y a 30 ans sur des parcelles viticoles dont les systèmes de cultures étaient comparables à ceux observés au cours de la thèse.

5.2 Effet de facteurs agro-pédologiques sur la distribution spatiale des espèces

5.2.1 Introduction

Des travaux antérieurs ont permis de caractériser la flore des vignes (e.g. Beuret, 1981 en Suisse; Espirito-Santo et al., 1990 au Portugal; Maillet, 1992 dans le Languedoc-Roussillon) mais les espèces d'adventices diffèrent entre zones géographiques. Il est donc difficile de s'appuyer sur ces résultats pour estimer la composition floristique de la zone étudiée. De plus, d'autres travaux ont montré que l'entretien du sol et les modalités de gestion des adventices influent sur les communautés floristiques (e.g. pour les cultures pérennes en rangées, Mas et al, 2007; Gago et al., 2007; Baumgartner et al., 2008). Les propriétés des sols conditionnent également la composition floristique des parcelles cultivées (e.g. Andreasen et al., 1991). Finalement, Fried et al. (2008) indiquent que les facteurs déterminants des communautés d'adventices sont très dépendants des échelles d'étude (groupe de parcelles, région, pays). Par conséquent, une étude des communautés floristiques de la zone d'étude s'est avérée nécessaire. Les facteurs environnementaux et agronomiques couramment identifiés comme influents sur les communautés ont été investigués pour évaluer leurs effets. Ainsi, on a effectué des relevés floristiques sur un bassin versant de taille moyenne (75 km²), ce qui permettait d'étudier une diversité de sols conséquente et qui correspond à la diversité de sols que peut avoir à gérer un viticulteur au sein de son exploitation.

5.2.2 Matériel et méthodes

5.2.2.1 Méthode d'échantillonnage

La zone d'étude est le bassin versant de la Peyne. Pour étudier la variabilité des communautés floristiques à l'échelle de la zone d'étude, 86 relevés floristiques ont été réalisés en novembre-décembre 2008 dans 82 parcelles gérées par au moins 25 viticulteurs différents et 95 relevés ont été réalisés en juin 2009 dans 75 parcelles gérées par au moins 28 viticulteurs différents (les viticulteurs concernés sont majoritairement les mêmes pour les deux séries de relevés). Ils ont été étalés en 4 passages pour chacune des deux saisons. L'échantillonnage des parcelles a été défini pour analyser la variabilité floristique selon deux facteurs principaux : le mode d'entretien du sol et le type de sol. Il a été réalisé indépendamment pour chacune des

saisons, les parcelles observées n'étant pas forcément les mêmes d'une saison à l'autre.

Les trois modalités d'entretien du sol suivies ont été :

- le travail du sol seul : il est réalisé 2 à 5 fois par an, ceux qui en réalisent 5 associent un travail du sol à l'automne, un à la fin de l'hiver et trois entre le début du printemps et le début de l'été, ceux qui n'en réalisent que deux, les positionnent généralement en fin d'hiver et au printemps. La majorité des travaux du sol sont réalisés avec un outil à dent.
- le désherbage chimique seul : il est aussi appelé non-culture, est généralement réalisé entre fin février et fin avril. La plupart des viticulteurs utilisent une association d'herbicide de pré-levée et de post-levée. Une minorité des surfaces entretenues de cette façon peut recevoir un second désherbage global ou localisé sur les repousses avec un herbicide de post-levée entre début mai et fin juillet.
- l'association travail du sol et désherbage chimique : elle se compose d'un désherbage chimique réalisé entre fin février et fin avril généralement avec un herbicide de post-levée seul et d'un travail du sol réalisé entre début mai et fin juillet. Un second travail du sol peut être réalisé à l'automne.

Les parcelles sélectionnées pour les relevés se caractérisaient par une modalité d'entretien du sol stabilisée depuis au moins 2 ans et les plus jeunes avaient été plantées en 2005. Comme les parcelles appartenaient à des viticulteurs différents, les caractéristiques des vignes (largeur d'inter-rang, palissage, cépage, porte-greffe) étaient variables. De même, les modalités précises d'entretien du sol (outil, intrants, calendrier) étaient variables au sein d'un type.

Les types de sol étudiés ont été sélectionnés selon leur représentativité dans la zone d'étude et sur les caractéristiques qui pouvaient influencer a priori la composition floristique : le pH du sol directement relié à la présence de calcaire actif et l'hydromorphie. Les cinq types de sol retenus ont été :

- les sols développés directement sur les dépôts calcaires du Miocène et sur les glacis colluviaux associés (codé « *MOL* » pour les figures) : ces sols sont moyennement profonds à très profonds, à texture équilibrée, peu caillouteux et calcaires dès la surface. Les mesures réalisées sur 4 profils indiquent des pH supérieurs à 8. Ces sols n'ont pas de tendance hydromorphe dans les horizons de surface.
- Les sols développés dans les dépressions mal drainées (codé « *HYD* » pour les figures) : ces sols sont très profonds, à texture limono-argileuse, à pH neutre à basique et comportant une hydromorphie marquée.
- les sols de la transition Mio-Pliocène développés sur les calcaires lacustres, avec une influence colluviale et/ou fluviale (codé « *HET* » pour les figures) : ces sols sont très variables tant en profondeur qu'en texture. Leur pH est irrégulièrement neutre à basique et le taux de calcaire actif est variable en fonction de la profondeur d'apparition du calcaire lacustre.
- les sols sur alluvions quaternaires anciennes et argile pliocène (codé « *NTR* » pour les figures) : ces sols sont argileux et souvent caillouteux. Les mesures réalisées sur deux profils montrent des pH variant de 7,5 à 8,5 et des taux de calcaire actif faibles en surface (horizon 0-70 cm).
- les sols sur alluvions « villafranchiennes » très évoluées (codé « *AC* » pour les figures) : ces sols sont profonds, de texture sablo-argileuse et acides, les mesures sur un profil indiquent un pH de 6,5 environ. Le taux de calcaire actif mesuré est nul.

Toutes les parcelles retenues pour les relevés sont choisies pour être représentatives de ces groupes pédologiques. Elles ont été sélectionnées grâce à une carte pédologique au 1/25 000 (Coulouma, 2008 ; Coulouma et al., 2008).

5.2.2.2 Méthode d'échantillonnage pour les relevés floristiques

Les relevés floristiques dans les parcelles de vigne ont été réalisés selon la méthode du transect en point contact (figure 5.1) en listant les espèces présentes tous les 10 cm le long d'un transect de 5m. On a donc listé les espèces présentes le long du transect en 51 points. Certaines plantes n'ont pu être identifiées qu'au niveau de leur genre car leur développement était incomplet ou parce qu'elles avaient été endommagées par les traitements d'entretien du sol appliqués.

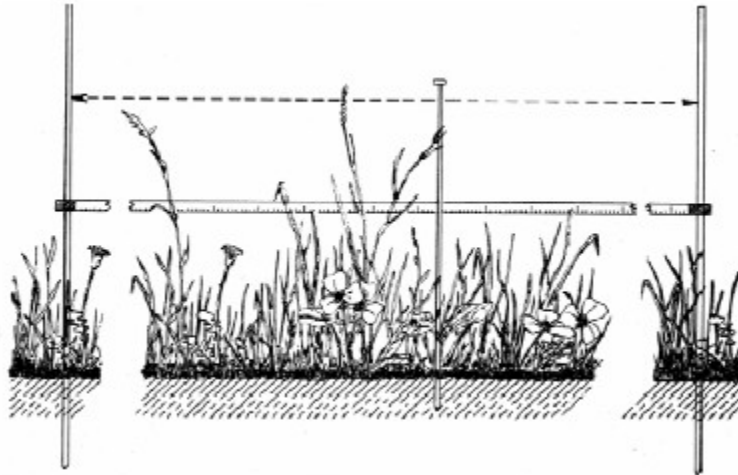


FIGURE 5.1 – Illustration représentant la méthode des points contacts d'échantillonnage de la végétation herbacée en transect linéaire, d'après Hubert (1978).

Tous les relevés ont été réalisés dans les inter-rangs, c'est à dire dans les allées entre les rangs de vignes. Un seul relevé a été réalisé par parcelle et par type d'entretien du sol, une parcelle ne pouvant relever que d'un type de sol. Cependant une parcelle pouvant réunir une à deux modalités d'entretien du sol pour les parties inter-rangs, il a pu être réalisé jusqu'à deux relevés dans une parcelle. L'emplacement du relevé dans la parcelle a été choisi avec l'objectif d'être représentatif de la flore présente sur la surface de la parcelle entretenue selon la modalité étudiée. Les zones en frontière des parcelles ont été évitées.

5.2.2.3 Traitement des données et analyses statistiques pour l'étude des communautés

Une communauté est un assemblage de populations coexistantes dans l'espace et dans le temps.

Trois facteurs de variations de ces communautés floristiques ont été étudiés :

- la saison ;
- la modalité d'entretien du sol ;
- le type de sol.

Pour caractériser les communautés et leur variabilité, l'étude s'est basée sur la richesse spécifique, les types biologiques des plantes, la fréquence et l'abondance relative des espèces. Toutes les analyses ont été réalisées avec le logiciel R (Ihaka and Gentleman, 1996). Nous détaillons ci-après la signification des différentes variables observées des communautés et les analyses statistiques basées sur ces variables.

La richesse spécifique La richesse spécifique (diversité alpha), c'est à dire le nombre d'espèces présentes, permet d'évaluer la diversité floristique. La richesse spécifique a été calculée pour chaque relevé. Ensuite, pour chaque facteur étudié, on a réalisé une analyse de variance. Si l'hypothèse nulle était rejetée et si le facteur avait plus de 2 modalités, un test de Tukey a été effectué. Ce test de comparaisons multiples sur les moyennes qui est une généralisation du test de Student permet d'identifier quelles sont les modalités dont les moyennes pour la variable étudiée diffèrent significativement.

Les types biologiques des plantes Toutes les plantes observées ont été classées selon leur type biologique en utilisant la classification de Raunkiaer (1934).

La classification des types biologiques selon Raunkiaer (1934)

Cette classification basée sur la situation par rapport au sol du point de croissance de la plante (bourgeon) regroupe cinq classes majeures :

- Phanérophytes : plantes pérennes herbacées ou ligneuses avec des bourgeons persistants à plus de 25 cm au-dessus du sol (arbres et arbustes) ;
- Chamaephytes : plantes vivaces avec des bourgeons ou des apex de feuilles persistants situés très près du sol (moins de 25 cm au-dessus) ;
- Hemicryptophytes : plantes avec des bourgeons persistants situés au niveau du sol ou juste au-dessus (adventices pérennes ou bisannuelles) ;
- Géophytes : plantes avec des bourgeons persistants sur la surface du sol ou en-dessous (bulbe, rhizome, tubercule) ;
- Therophytes : plantes annuelles qui survivent en conditions défavorables sous forme de graines.

Certaines plantes peuvent être rattachées à plusieurs types biologiques, par conséquent on a utilisé les cinq classes majeures et une sixième classe pour les plantes Therophytes/Hemicryptophytes qui peuvent aussi bien avoir un fonctionnement annuel ou bisannuel.

Pour chaque facteur étudié, un test du χ^2 a été réalisé sur la table de contingence croisant les 6 classes de types biologiques et les modalités du facteur étudié. Ce test permet d'établir la liaison éventuelle entre les différentes modalités du facteur étudié. Il compare la distribution observée des effectifs entre types biologiques pour chaque modalité du facteur à la distribution théorique correspondant à une distribution équilibrée entre chaque modalité du facteur : chaque type biologique est dans une proportion égale quelque soit la modalité du facteur étudié.

TABLE 5.1 – Moyenne de l'abondance, fréquence et types biologiques des espèces à l'automne et au printemps

Code	Espèce	Automne		Printemps		Type biologique
		Moyenne abondance relative	Fréquence	Moyenne abondance relative	Fréquence	
ALLPT	<i>Allium polyanthum</i>	14,60	15,12	-	-	Geophyte
	<i>Allium vineale</i>	1,47	2,33	-	-	Geophyte
AMARE	<i>Amaranthus retroflexus</i>	5,77	22,09	20,70	26,60	Therophyte
	<i>Aristolochia clematidis</i>	-	-	7,01	2,13	Geophyte
	<i>Aster squamatus</i>	-	-	3,60	2,13	Hemicryptophyte
AVESS	<i>Avena spp.</i>	1,94	5,81	5,34	11,70	Therophyte
	<i>Bothriochloa ischaemum</i>	8,29	8,14	-	-	Hemicryptophyte
	<i>Bromus spp.</i>	4,58	6,98	5,81	9,57	Therophyte
CLDAR	<i>Calendula arvensis</i>	9,31	32,56	10,56	6,38	Therophyte
	<i>Capsella bursa-pastoris</i>	2,84	2,33	1,59	1,06	Therophyte
	<i>Cardaria draba</i>	38,08	3,49	7,11	2,13	Geophyte
	<i>Chenopodium album</i>	1,02	1,16	9,96	9,57	Therophyte
CIRAA	<i>Cirsium arvense</i>	5,04	30,23	24,29	21,28	Geophyte
CONAR	<i>Convolvulus arvensis</i>	8,63	54,65	37,04	78,72	Geophyte
ERICA	<i>Coryza canadensis</i>	3,92	17,44	18,18	26,60	Therophyte/Hemicryptophyte
ERIFL	<i>Coryza sumatrensis</i>	6,56	30,23	11,55	27,66	Therophyte
CV PSS	<i>Crepis spp.</i>	7,16	65,12	4,07	17,02	Therophyte/Hemicryptophyte
	<i>Cynodon dactylon</i>	14,80	3,49	22,67	5,32	Hemicryptophyte
	<i>Dactylis glomerata</i>	4,81	4,65	-	-	Hemicryptophyte
DAUCA	<i>Daucus carota</i>	3,93	15,12	13,36	10,64	Hemicryptophyte
DIPER	<i>Diptotaxis eruroides</i>	19,53	72,09	23,92	35,11	Therophyte
	<i>Dittrichia viscosa</i>	-	-	4,55	4,26	Hemicryptophyte
	<i>Epilobium tetragonum</i>	0,88	1,16	3,15	2,13	Hemicryptophyte
EQURA	<i>Equisetum ramosissimum</i>	4,21	6,98	23,49	12,77	Geophyte
EROCC	<i>Erodium ciconium</i>	2,04	17,44	15,80	6,38	Therophyte
EROCI	<i>Erodium cicutarium</i>	7,36	32,56	6,49	6,38	Therophyte
	<i>Erodium malacoides</i>	2,62	6,98	1,15	2,13	Therophyte
EPHSS	<i>Euphorbia spp.</i>	3,47	23,26	15,15	6,38	Therophyte
	<i>Galium parisiense</i>	-	-	14,93	7,45	Therophyte
GERMO	<i>Geranium molle</i>	-	-	4,72	18,09	Therophyte
GERRT	<i>Geranium rotundifolium</i>	10,64	56,98	7,67	4,26	Therophyte
	<i>Heliotropium europaeum</i>	3,21	5,81	5,27	4,26	Therophyte
HORMU	<i>Hordeum murinum</i>	9,36	12,79	18,39	4,26	Therophyte
	<i>Koeleria phleoides</i>	-	-	22,54	3,19	Therophyte
LACSE	<i>Lactuca serriola</i>	1,91	4,65	6,27	18,09	Therophyte
LAMAM	<i>Lamium amplexicaule</i>	8,41	32,56	17,43	4,26	Therophyte
	<i>Lepturus spp.</i>	44,39	2,33	-	-	Therophyte
LOLSS	<i>Lolium spp.</i>	9,96	17,44	5,06	11,70	Therophyte/Hemicryptophyte
MALSI	<i>Malva sylvestris</i>	11,91	20,93	13,76	7,45	Hemicryptophyte
MEDSS	<i>Medicago spp.</i>	7,64	23,26	12,73	5,32	Therophyte/Hemicryptophyte
	<i>Mercurialis annua</i>	2,79	2,33	-	-	Therophyte
MUSRA	<i>Muscari neglectum</i>	7,70	41,86	-	-	Geophyte
	<i>Ononis viscosa</i>	-	-	1,03	2,13	Therophyte
	<i>Papaver rhoeas</i>	-	-	1,51	2,13	Therophyte
PICSS	<i>Picris spp.</i>	17,42	32,56	9,63	24,47	Therophyte/Hemicryptophyte
POAAN	<i>Poa annua</i>	32,78	34,88	10,33	7,45	Therophyte
	<i>Polygonum aviculare</i>	-	-	8,52	4,26	Therophyte
POROL	<i>Portulaca oleracea</i>	8,61	17,44	21,33	22,34	Therophyte
	<i>Quercus ilex</i>	-	-	0,77	1,06	Phanerophyte
	<i>Rumex bucephalophorus</i>	81,82	1,16	24,96	2,13	Therophyte
	<i>Rumex crispus</i>	-	-	1,50	2,13	Hemicryptophyte
RUMPU	<i>Rumex pulcher</i>	11,18	17,44	4,98	9,57	Hemicryptophyte
	<i>Scorpiurus subvillosus</i>	-	-	20,94	2,13	Therophyte
SENVU	<i>Senecio vulgaris</i>	3,88	30,23	8,45	7,45	Therophyte
SETSS	<i>Setaria spp.</i>	3,52	3,49	20,66	31,91	Therophyte
	<i>Silybum marianum</i>	2,50	4,65	-	-	Hemicryptophyte
SOLNI	<i>Solanum nigrum</i>	1,99	4,65	6,13	15,96	Therophyte
SONOL	<i>Sonchus oleraceus</i>	2,97	26,74	5,80	34,04	Therophyte
	<i>Sorghum halepense</i>	3,77	1,16	-	-	Geophyte
STEME	<i>Stellaria media</i>	12,90	37,21	7,89	1,06	Therophyte
	<i>Taraxacum officinale</i>	3,56	3,49	1,30	1,06	Hemicryptophyte
	<i>Tragus racemosus</i>	-	-	33,63	5,32	Therophyte
	<i>Trifolium arvense</i>	-	-	4,76	3,19	Therophyte
VERSS	<i>Veronica spp.</i>	12,46	58,14	18,06	8,51	Therophyte
	<i>Vicia sativa</i>	28,57	1,16	1,46	2,13	Therophyte
	Moyenne	10,37	19,15	11,41	10,94	
	Ecart-type	13,62	18,25	8,63	12,94	

La fréquence La fréquence de chaque espèce au sein des relevés a été calculée comme la proportion des relevés dans lesquels figurait l'espèce sur le nombre total de relevés.

La fréquence des espèces a été calculée par saison puis pour chaque saison, selon les deux autres facteurs étudiés.

L'abondance relative L'abondance relative, deuxième composante de la diversité, est définie comme la proportion de chaque espèce sur le nombre des individus totaux.

Pour chaque saison, l'abondance relative moyenne a été calculée pour chaque espèce (la moyenne des abondances de l'espèce sur les relevés incluant l'espèce).

Ensuite, des analyses multivariées sur l'abondance relative de chaque espèce au sein de chaque relevé ont été réalisées pour étudier l'effet des facteurs entretien du sol et type de sol. Ces analyses ont été réalisées saison par saison. Seules les espèces avec une fréquence supérieure à 10% à l'échelle de la saison ont été soumises à l'analyse, la présence d'espèces dont la fréquence est inférieure pouvant être considérée comme accidentelle (Mueller-Dombois et Ellenberg, 1974).

L'analyse canonique des correspondances a été sélectionnée (ter Braak et Prentice, 1988 ; Legendre et Legendre, 1998). Cette analyse est largement utilisée en écologie pour modéliser la relation entre la composition floristique et des variables environnementales mesurées et elle a un bon potentiel pour étudier la réponse de communautés d'adventices à différents traitements agronomiques (Kenkel et al., 2002). La méthode utilise des régressions linéaires multiples pour sélectionner les combinaisons linéaires des variables agro-pédologiques qui maximisent la dispersion des coordonnées associées aux espèces. L'analyse a été réalisée avec le paquet Vegan (Oksanen et al., 2010).

Chaque facteur a été étudié séparément pour évaluer l'effet des modalités des facteurs sur les communautés. Ensuite pour étudier la part de chacun des facteurs, on a réalisé une analyse de variance avec test par permutation qui permet de réaliser différentes comparaisons de modèles : modèle initial vs modèle à 1 facteur ; modèle à 1 facteur vs modèle à 2 facteurs.

5.2.3 Résultats

5.2.3.1 Effet de la saison

Au total 78 espèces ont été enregistrées dont 55 ont été observées à l'automne et 65 au printemps. Le tableau 5.1 présente la liste des 65 espèces observées plus d'une fois lors des relevés au cours d'une saison et leur type biologique.

Les fréquences et les abondances relatives moyennes des espèces montrent que la composition floristique globale à l'échelle de la zone d'étude diffère entre l'automne et le printemps. Certaines espèces au développement saisonnier comme *Polygonum aviculare* n'apparaissent qu'à une seule saison. D'autres espèces peuvent se développer aux deux saisons. Parmi ces dernières, certaines ont effectivement été observées de manière significative aux deux saisons comme *Diploaxis erucoïdes* mais d'autres ne sont significativement présentes qu'à une saison comme *Stellaria media*.

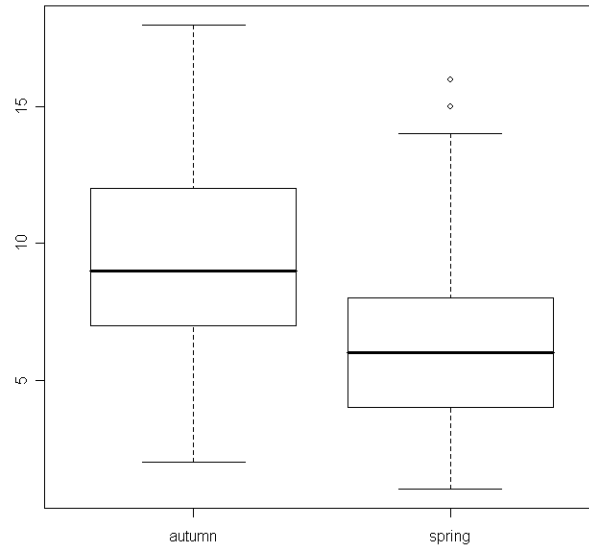


FIGURE 5.2 – Box-plot de la richesse spécifique intra-parcellaire à l'automne et au printemps

L'analyse de variance sur la richesse spécifique intra-parcellaire montre qu'elle est plus importante à l'automne (médiane = 9) qu'au printemps (médiane = 6) bien que le nombre total d'espèces observées à cette saison soit plus élevé (figure 5.2).

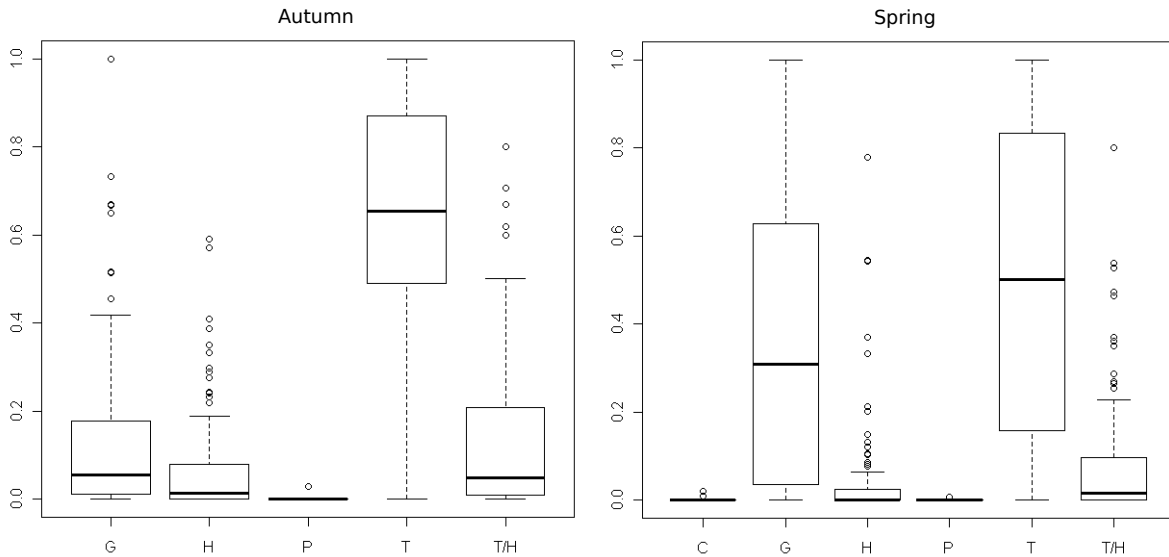


FIGURE 5.3 – Box-plot de la distribution des types biologiques à l'automne et au printemps

L'ordonnée indique le pourcentage des types biologiques. G=Géophytes ; H=Hémicryptophytes ; P=Phanérophytes ; T=Thérophytes ; T/H=Thérophytes/Hémicryptophytes ; C=Chamaephytes

Finalement, le test du χ^2 sur les types biologiques a montré que leur distribution était significativement différente au seuil de 0.1% selon la saison. Les thérophytes sont le type biologique dominant aux deux saisons mais la part de géophytes est plus importante au printemps qu'à l'automne (figure 5.3).

5.2.3.2 Effet de l'entretien du sol

L'étude de la richesse spécifique en fonction des différentes modalités d'entretien du sol indique qu'au printemps il n'y a pas de différence significative au seuil de 5% mais qu'à l'automne, l'entretien par non-culture présente une richesse plus importante : médiane de 11 contre des médianes de 8 et 8.5 pour les deux autres modalités (figure 5.4).

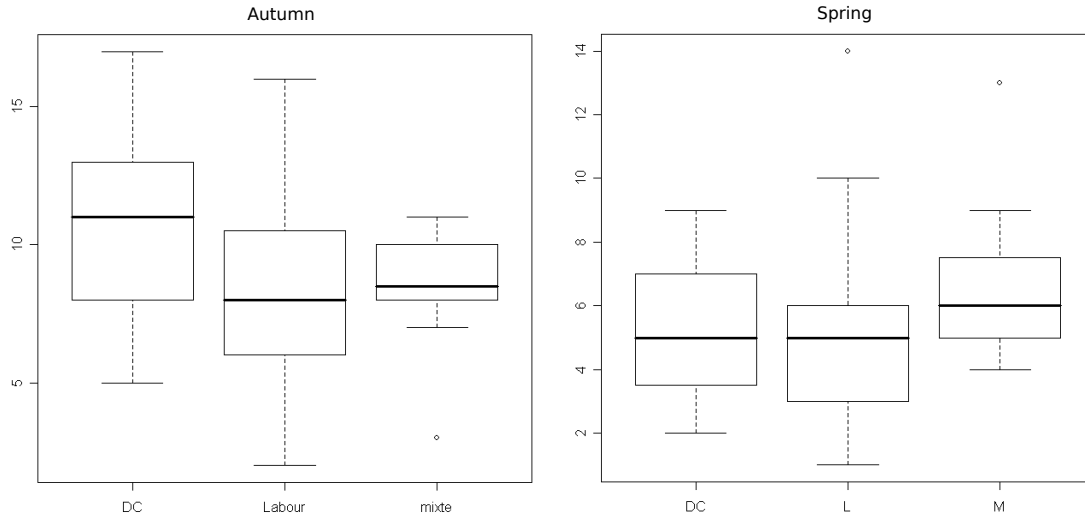


FIGURE 5.4 – Box-plot de la richesse spécifique intra-parcellaire à l'automne et au printemps pour trois modalités d'entretien du sol.

DC = désherbage chimique ; labour = travail du sol ; Mixte = association travail du sol et désherbage chimique.

Concernant les types biologiques, les thérophytes sont dominants quelque soit le mode de gestion des adventices (tableau 5.2). Cependant, aux deux saisons, on observe une différence significative au seuil de 0.1% entre les distributions des types biologiques selon les différentes modalités d'entretien du sol. Le travail du sol favorise la présence des géophytes : *Allium polyanthum*, *Cardaria draba* et *Muscari neglectum* à l'automne, *Convolvulus arvensis*, *Equisetum ramosissimum* et *Cirsium arvense* au printemps. La non-culture a une part de géophytes plus réduite mais possède la part la plus élevée d'hémicryptophytes à l'automne par la présence d'espèces comme *Daucus carota*, *Malva sylvestris* et *Rumex pulcher*. La gestion des adventices par entretien mixte présente une distribution des types biologiques très favorable aux plantes annuelles avec des parts faibles de géophytes et d'hémicryptophytes.

TABLE 5.2 – Proportions moyennes des types biologiques à l'automne et au printemps pour trois modalités d'entretien du sol.

		C	G	H	P	T	T/H
Autumn	DC		7.1	10.8	0	60.9	21.2
	Labour		16.3	6.7	0.1	66.7	10.2
	Mixte		9.2	1.3	0	73.6	15.9
Spring	DC	0.05	24.0	5.5	0.05	60.1	10.3
	Labour	0	42.6	5.7	0	46.3	5.4
	Mixte	0	32.5	1.5	0	51.0	15.0

DC = désherbage chimique ; labour = travail du sol ; Mixte = association travail du sol et désherbage chimique. G=Géophytes ; H=Hémicryptophytes ; P=Phanérophtes ; T=Thérophytes ; T/H=Thérophytes/Hémicryptophytes ; C=Chamaephytes

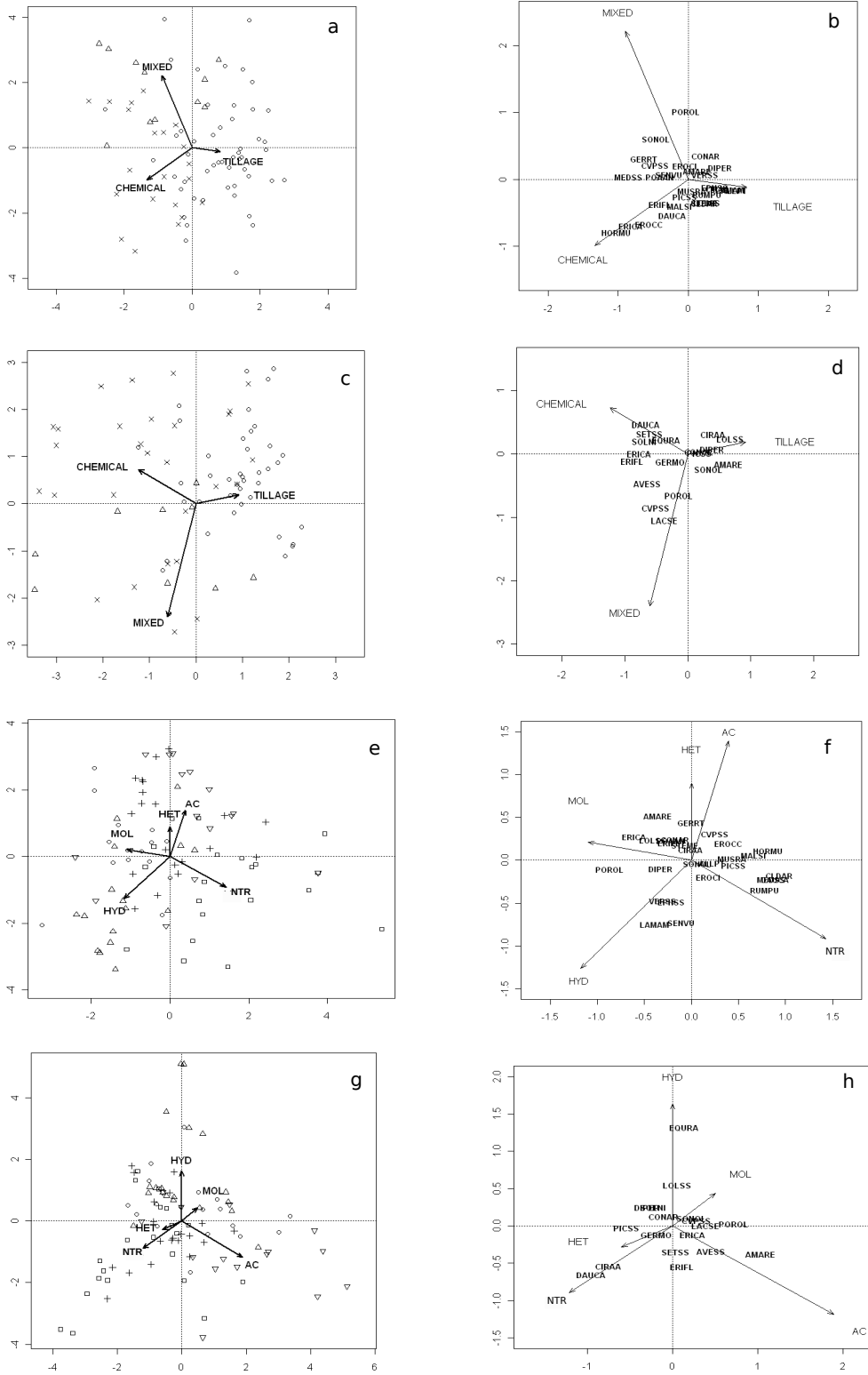


FIGURE 5.5 – Analyses canoniques des correspondances sur l’entretien du sol (a,b,c,d) et le type de sol (e,f,g,h) à deux saisons : automne (a,b,e,f) et printemps (c,d,g,h).

Les graphes de gauche représentent les sites observés et les graphes de droite les espèces dans le plan factoriel 1-2 de l’analyse canonique des correspondances

L'analyse canonique des correspondances (figure 5.5) montre des différences significatives de composition floristique entre modalités d'entretien du sol. En effet, la distribution spatiale des sites observés (graphes a et c) montre que les modalités sont fortement discriminées sur leur composition floristique. On peut voir sur les graphes b et d que les espèces se classent en trois catégories : (i) ubiquistes comme l'indique leur position proche de l'origine du graphe (e.g. *Veronica spp.* à l'automne ou *Convolvulus arvensis* au printemps) ; (ii) dominantes pour certaines modalités comme l'indique leur position proche d'une modalité donnée (e.g. *Hordeum murinum* à l'automne ou *Lactuca serriola* au printemps) ; (iii) présentes chez deux modalités comme l'indique leur position intermédiaire entre deux modalités données et éloignées de l'origine (e.g. *Medicago spp.* à l'automne ou *Avena spp.* au printemps). Les espèces les plus caractéristiques du travail du sol sont *Allium polyanthum* et *Lamium amplexicaule* à l'automne et *Lolium spp.* et *Diplotaxis erucoïdes* au printemps. Les espèces les plus caractéristiques du désherbage chimique sont *Hordeum murinum*, *Conyza canadensis* et *Erodium ciconium* à l'automne et *Daucus carota* et *Setaria spp.* au printemps. A l'automne, l'entretien mixte est caractérisé par la présence de *Portulaca oleracea* que l'on retrouve également au printemps avec *Lactuca serriola*. Les espèces présentes pour deux modalités concernent essentiellement les modalités désherbage chimique et mixte. La présence de ces espèces semble donc liée à l'application d'herbicide qui est le point commun de ces deux modalités. A l'automne, on trouve *Geranium rotundifolium*, *Crepis spp.*, *Poa annua* et *Medicago spp.* ; au printemps on trouve *Conyza canadensis*, *Conyza sumatrensis* et *Avena spp.*. Les espèces qui concernent un autre couple de modalités sont moins nombreuses. On remarquera tout de même trois espèces présentes aussi bien dans les parcelles entretenues par travail du sol que par désherbage chimique mais absentes dans le cas d'entretien mixte : *Stellaria media*, *Calendula arvensis* et *Lolium spp.*.

5.2.3.3 Effet du type de sol

Les types de sol n'ont pas d'influence sur la richesse spécifique ou sur la composition en types biologiques. Les analyses canoniques des correspondances (figure 5.5) indiquent une discrimination des communautés floristiques par les sols. Cependant, on peut voir sur les graphes e et g que les sites observés sont moins bien discriminés par les types de sol que par les modalités d'entretien du sol (graphes a et c).

A l'automne (graphe f), les espèces ubiquistes pour les sols sont *Cirsium arvense*, *Sonchus oleraceus*, *Allium polyanthum* et *Stellaria media*. On peut d'abord constater que les communautés floristiques des sols les plus acides (« AC ») ainsi que des sols les plus hétérogènes en terme de caractéristiques physico-chimiques (« HET ») sont proches et peu spécialisées. Ceci est lié en partie au fait que les espèces dominantes sur ces sols (e.g. *Rumex bucephalophorus*) n'avaient pas des fréquences suffisantes pour figurer dans l'analyse. Le premier axe explique 45,5% de la variation. Il sépare les sols sur leur pH : les sols plus acides ont des valeurs positives quand les sols basiques ont des valeurs négatives. On trouve ainsi des espèces calcicoles comme *Diplotaxis erucoïdes* plus présentes sur les sols à pH élevé. Cependant, d'autres espèces calcicoles comme *Picris spp.* ou *Calendula arvensis* ont été plus observées en sols neutres ou acides. Le second axe explique 23,9% de la variation et discrimine les sols sur leur hydromorphie. On trouve ainsi des espèces appréciant les sols humides comme *Lamium amplexicaule* ou *Veronica spp.*, présentes sur les sols hydromorphes.

Au printemps (graphe h), les espèces ubiquistes pour les sols sont *Convolvulus arvensis*, *Sonchus oleraceus*, *Crepis spp.*, *Conyza canadensis* et *Geranium molle*. On observe une plus grande spécialisation des communautés floristiques à cette saison : *Equisetum ramosissimum*

TABLE 5.3 – Espèces majoritaires (indiquées par +) en fonction des entretiens du sol et des types de sol

	Ac		Ntr		Het		Mol		Hyd	
	DC	labour	DC	Mixte	labour	DC	Mixte	labour	DC	labour
PRINTEMPS										
nb parcelles	5	9	9	2	10	7	4	9	6	8
may richesse	4,40	4,78	4,67	6,50	3,90	5,86	8,00	4,78	4,67	5,88
<i>Convolvulus arvensis</i>	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Coryza canadensis</i>	+	-	+	+	-	+	-	-	+	+
<i>Diploaxis erucoides</i>	-	-	-	-	+	-	+	+	+	+
<i>Setaria spp.</i>	+	+	+	-	+	+	-	-	+	+
<i>Cirsium arvense</i>	-	+	+	-	-	+	-	-	-	+
<i>Amaranthus retroflexus</i>	-	+	-	-	-	-	-	+	-	+
<i>Picris spp.</i>	-	-	+	+	-	-	-	-	-	+
<i>Equisetum ramosissimum</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
<i>Portulaca oleracea</i>	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+
<i>Coryza sumatrensis</i>	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-
<i>Erodium ciconium</i>	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-
<i>Solanum nigrum</i>	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+
<i>Calendula arvensis</i>	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Daucus carota</i>	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
<i>Lactuca scariola</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Sonchus oleraceus</i>	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AUTOMNE										
nb parcelles	5	10	7	3	10	6	4	10	4	11
may richesse	10,6	8,9	10,6	8,3	7,9	11,0	7,3	6,7	9,3	11,5
<i>Poa annua</i>	+	+	+	-	-	+	-	+	+	+
<i>Veronica spp.</i>	-	-	+	+	+	-	+	+	-	+
<i>Picris sp.</i>	-	-	+	+	+	-	-	+	-	+
<i>Stellaria media</i>	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-
<i>Diploaxis erucoides</i>	-	-	-	-	+	-	+	+	-	+
<i>Geranium rotundifolium</i>	+	-	-	+	-	+	-	-	+	-
<i>Crepis sp.</i>	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-
<i>Erodium cicutarium</i>	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+
<i>Malva sylvestris</i>	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-
<i>Calendula arvensis</i>	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-
<i>Convolvulus arvensis</i>	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-
<i>Lamium amplexicaule</i>	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+
<i>Lolium spp.</i>	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+
<i>Muscari neglectum</i>	-	-	-	-	+	-	+	-	-	-
<i>Rumex pulcher</i>	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-
<i>Allium polyanthum</i>	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-
<i>Hordeum murinum</i>	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
<i>Medicago sp.</i>	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-

DC = désherbage chimique; Mixte = association travail du sol et désherbage chimique; labour = travail du sol.

est dominante sur les sols hydromorphes (« HYD »), *Daucus carota* et *Cirsium arvense* sont dominantes sur les sols sur alluvions quaternaires anciennes et argile pliocène (codé « NTR ») et *Amaranthus retroflexus* est dominante sur les sols les plus acides (« AC »). Le gradient entre les sols acides et les sols basiques et entre les sols non hydromorphes à cette saison et hydromorphes est défini par le second axe qui explique 35,9% de la variation. On trouve ainsi les espèces calcifuges (e.g. *Setaria spp.*, *Avena spp.*) plutôt sur les sols neutres mais comme à l'automne, on trouve également des espèces calcicoles sur ces sols (e.g. *Daucus carota*). Les sols aux caractéristiques les moins extrêmes ou les plus variées en terme de pH et d'hydromorphie (« MOL » et « HET ») sont les plus proches de l'origine avec en conséquence des communautés floristiques composées d'espèces plutôt ubiquistes.

5.2.3.4 Les espèces majoritaires selon les croisements entretien du sol - type de sol

L'analyse de variance avec test par permutation montre qu'aux deux saisons les deux facteurs : entretien du sol et type de sol, ont un effet significatif au seuil de 1% sur la composition floristique. Les modèles à un facteur sont toujours plus explicatifs que le modèle initial. Les modèles à deux facteurs expliquent mieux la composition des communautés que les modèles à un facteur. Ils sont significativement différents au seuil de 1% excepté à l'automne. A cette saison, l'intégration du facteur type de sol dans un modèle comprenant le facteur entretien du sol fournit un modèle significativement plus explicatif au seuil de 5% seulement.

Les deux facteurs ayant une influence sur la composition des communautés, on présente dans le tableau 5.3 les espèces majoritaires présentes à chaque saison dans les parcelles d'un entretien du sol et d'un type de sol donnés. Les espèces sont classées de manière décroissante selon le nombre de modalités dans lesquelles elles sont présentes. Du fait de la richesse plus grande à l'automne qu'au printemps, les espèces présentes pour un type de parcelle donné sont plus nombreuses à cette saison. Cependant, on observe la même structuration des communautés aux deux saisons. Il y a une espèce présente dans au moins deux tiers des modalités : *Convolvulus arvensis* à l'automne et *Poa annua* au printemps. Trois espèces sont présentes dans 50 à 60% des modalités : *Conyza canadensis*, *Diplotaxis erucoïdes* et *Setaria spp.* au printemps ; *Veronica spp.*, *Picris spp.* et *Stellaria media* à l'automne. Puis les espèces restantes sont présentes dans moins de 50% des modalités. L'espèce la plus répandue parmi les modalités est une espèce relativement ubiquiste parmi les entretiens du sol et les types de sol. Leur position sur les graphes d'analyses canoniques des correspondances est située près de l'origine. Les espèces présentes dans 50 à 60% des modalités sont des espèces plutôt répandues mais qui sont absentes de certaines modalités d'entretien du sol ou de type de sol. Par exemple, *Conyza canadensis* et *Stellaria media* sont des espèces ubiquistes parmi les types de sol mais la première est plus caractéristique des modalités d'entretien du sol incluant un désherbage chimique et la seconde est absente des parcelles avec un entretien mixte. A l'inverse, *Veronica spp.* est une espèce ubiquiste parmi les modalités d'entretien du sol mais elle est plutôt dominante dans les sols à tendance hydromorphe. Les espèces les moins répandues parmi les modalités sont les espèces les plus spécialisées d'un entretien du sol et/ou d'un type de sol donné. Par exemple, *Lamium amplexicaule* est simultanément caractéristique des parcelles présentant de l'hydromorphie et entretenues par travail du sol ; *Lactuca serriola* est ubiquiste parmi les sols mais très dominante dans la modalité d'entretien mixte.

5.2.4 Discussion et conclusion

Quelque soit le facteur étudié (saison, entretien du sol, type de sol), les espèces observées sont majoritairement des thérophytes. Des résultats similaires ont été obtenus par Gago et al. (2007). Cependant le test du χ^2 sur les types biologiques a montré que leur distribution était significativement différente à 0,1% selon la saison. En effet, malgré une dominance des thérophytes, la part de géophytes est plus importante au printemps qu'à l'automne. Cette différence est liée aux espèces dominantes à chaque saison : *Convolvulus arvensis* et *Equisetum ramosissimum* au printemps ; *Diplotaxis erucoïdes* et *Poa annua* à l'automne. Les fréquences et les abondances relatives moyennes des espèces sur l'ensemble de la zone d'étude confirment les différences de composition floristique entre les saisons liées aux cycles de vie des espèces.

Les différences observées entre les deux saisons ne sont cependant pas seulement liées aux cycles de vie des espèces. En effet, la variabilité intra-parcellaire (richesse spécifique) plus importante à l'automne associée à une variabilité inter-parcellaire plus faible (nombre total d'espèces moins important qu'au printemps) peut être reliée aux différences entre les interventions culturales aux deux saisons. Ces dernières sont plus nombreuses et régulières au printemps, elles limitent donc plus fortement la croissance des plantes adventices. De plus, le climat est plus sec. L'influence des interventions culturales semblent confirmée par l'observation d'une richesse plus élevée à l'automne dans les zones entretenues par désherbage chimique. En effet, la non-culture est le mode de gestion des adventices qui impose le moins de perturbation à l'automne, un travail du sol n'étant jamais réalisé à cette saison et la dernière application d'herbicide datant le plus souvent de la fin de l'hiver précédent (Légère et al., 2005).

On a également observé que certaines espèces dont le cycle de vie leur permettait d'être présentes aux deux saisons, ne l'étaient pas toujours (e.g. *Stellaria media*). Les modalités d'entretien du sol créent donc, là encore, des contraintes sur le développement des espèces.

Le travail du sol, qui est le mode de gestion qui inclue le plus d'interventions culturales, permet de limiter la présence des plantes pérennes mais semble favoriser la présence des géophytes en divisant et propageant leurs tubercules, bulbes et rhizomes (Bernal, 1988). En ce qui concerne les espèces annuelles, les analyses canoniques des correspondances indiquent que les espèces caractéristiques de ce mode d'entretien du sol possèdent des germinations étalées dans le temps (e.g. *Diplotaxis erucoïdes*, *Veronica spp.*) ou se développent en dehors des périodes de travail du sol (e.g. *Amaranthus retroflexus* qui se développe en été).

La gestion par désherbage chimique seul permet d'éliminer la plupart des géophytes. La part de géophytes qui demeure est fortement liée à *Equisetum ramosissimum*, résistante au glyphosate. Cependant, ce mode de gestion, par son faible nombre d'interventions, permet l'installation de plantes pérennes et notamment de celles qui présentent des résistances aux herbicides comme *Malva sylvestris*. Parmi les espèces annuelles caractéristiques du désherbage chimique on retrouve également des espèces résistantes aux herbicides (e.g. *Conyza canadensis*, *Setaria spp.*) (Basu et al., 2004) ; celles dont la structure des feuilles limite l'efficacité de l'herbicide (e.g. *Geranium rotundifolium*, *Erodium spp.*) mais également des espèces se développant sur des sols compactés (e.g. *Crepis spp.*).

Les distributions des types biologiques dans le cas d'un entretien combinant les deux moyens de gestion des adventices (travail du sol et désherbage chimique) confirment les précédents résultats : les plantes annuelles sont largement dominantes car le désherbage chimique limite la part de géophytes et le travail du sol celle des hémicryptophytes. Parmi les annuelles, comme pour les zones entretenues par désherbage chimique, on retrouve des espèces résistantes aux herbicides (e.g. *Conyza canadensis*). Cependant, la combinaison des deux modalités semble plus contraignante pour le développement des plantes. En effet, certaines espèces annuelles

pourtant ubiquistes pour les deux modalités d'entretien du sol (travail du sol et désherbage chimique) ne sont pas observées quand les modalités sont combinées (e.g. *Stellaria media*, *Calendula arvensis*, *Lolium spp.*).

Les techniques d'entretien du sol employées ainsi que leur rythme conditionnent donc la communauté floristique présente via les types biologiques et les espèces annuelles représentées.

L'étude de différents types de sol aux caractéristiques de pH et d'hydromorphie variées montre que le sol peut favoriser ou à l'inverse interdire la présence de certaines espèces. On a vu par exemple, qu'*Equisetum ramosissimum* était largement favorisée par les sols hydromorphes alors que *Diplotaxis erucoïdes* était peu voire pas observée sur les sols à pH acide. On a pu également observer la présence d'espèces sur des sols qui en théorie ne sont pas favorables à leur développement (e.g. *Calendula arvensis*, espèce calcicole, observée sur des sols neutres à acides). Ces observations peuvent être liées à l'utilisation d'une carte pédologique au 1/25000 pour définir les types de sol des parcelles. En effet, au sein d'une unité pédologique de la carte, des variabilités de caractéristiques sont possibles d'une parcelle à l'autre. Le type de sol conditionne donc la structure des communautés d'adventices mais l'étude des espèces majoritaires par saison, entretien et type de sol indique que la discrimination porte sur un nombre d'espèces limité. Dans la zone d'étude, la majorité des espèces les plus fréquentes peuvent se développer sur tous les types de sols. Les différences reposent principalement sur leur abondance.

En conclusion, les communautés floristiques se structurent en fonction des contraintes : saison, entretien du sol, type de sol et se partagent entre des espèces ubiquistes qui s'adaptent à des contraintes variées et des espèces spécialisées qui sont adaptées à des contraintes particulières (par exemple, l'application d'herbicide).

5.3 Evolution temporelle des communautés floristiques des agrosystèmes

5.3.1 Introduction

On a vu que la composition floristique dépendait des modalités d'entretien du sol mises en oeuvre et que le type de sol pouvait également limiter les espèces candidates d'une parcelle. Cependant les observations n'ont été réalisées que pour un cycle cultural. On n'a donc pas pu intégrer l'effet année qui intègre l'effet climatique sur nos observations. Par conséquent, pour nous permettre d'évaluer si les communautés sont stables au cours du temps, on a procédé à une comparaison de nos relevés avec des relevés floristiques de 1979 réalisés sur différentes zones viticoles du Montpelliérais.

5.3.2 Matériel et méthodes

5.3.2.1 Protocole des relevés floristiques réalisés en 1979

Trois-cents quatre relevés ont été réalisés par Maillet (1981, 1992) dans le Montpelliérais sur 70 stations. Les relevés se sont répartis sur trois saisons : le printemps (avril), l'été (début juillet) et l'automne (septembre-octobre). La liste floristique était établie en réalisant d'abord un parcours rapide de la parcelle puis en prospectant une aire minimale de 400m² en réalisant un échantillonnage semi-continu en W. Les relevés ont donc été réalisés indifféremment dans les parties rangs ou inter-rangs majoritairement entretenues de la même façon. Chaque espèce était affectée d'un coefficient d'abondance suivant l'échelle de Barralis (1976) qui permet d'évaluer

une abondance relative moyenne d'après le nombre d'individus au m² suivant une échelle semi-logarithmique. Les deux modalités d'entretien du sol étudiées ont été : le travail du sol seul (163 relevés) et le désherbage chimique seul (131 relevés). L'abondance relative moyenne et la fréquence des espèces ont été données pour chacun de ces deux traitements. Ces valeurs étant fournies toutes saisons confondues, les calculs des moyennes ont exclu les éventuelles observations d'espèces en dehors de leur période de développement théorique (Maillet, J., communication personnelle).

5.3.2.2 Les modes d'entretien du sol en 1979

La majorité des parcelles étaient conduites en gobelet sans palissage. Par conséquent, l'ensemble de la surface de la parcelle (rang et inter-rang) était entretenue de manière homogène.

Les parcelles travaillées étaient entretenues avec des outils à socs qui permettaient de butter les plants de vignes à l'automne et de les décavaillonner en sortie d'hiver. Les parcelles recevaient généralement un travail du sol supplémentaire au cours du printemps effectué avec un outil rotatif (Maillet, 1992).

Les parcelles entretenues en non-culture étaient désherbées chimiquement sur l'ensemble de la surface. 95% des viticulteurs utilisaient une association simazine et aminotriazole en application unique au printemps (Maillet, 1992).

5.3.2.3 Méthode de comparaison des relevés floristiques

Dans le but d'établir les fréquences et abondances relatives moyennes des espèces observées en 2008-2009 à comparer avec les données de 1979, on n'a retenu pour chaque espèce que les relevés correspondant à leur saison théorique de développement. Les espèces n'ayant été observées qu'en dehors de leur saison théorique n'ont donc pas été retenues pour l'étude. A partir de ces relevés, on a calculé pour chaque espèce sa fréquence et son abondance relative moyenne, moyenne des abondances relatives de l'espèce pour les relevés comportant l'espèce.

Pour chacune des deux modalités d'entretien du sol : travail du sol seul et désherbage chimique seul, suivies en 1979 et en 2008-2009, les nombres C des espèces rémanentes, A des espèces nouvelles et D des espèces disparues ont été établis. Les méthodes des relevés de 1979 et de 2008-2009 étant distinctes, les fréquences et les abondances moyennes ont été centrées et réduites pour pouvoir être comparées.

Pour les espèces rémanentes, le coefficient rho de Spearman (Spearman, 1904) a été calculé pour chaque variable (fréquence et abondance) et pour chaque modalité d'entretien du sol. Cette statistique qui suit une loi de Student permet d'évaluer la corrélation entre les rangs des valeurs prises par les variables. Elle convient pour des relations non-linéaires et des valeurs exceptionnelles et s'adapte donc bien aux données écologiques. La valeur prise par le coefficient varie entre -1 et 1 avec l'interprétation suivante : le signe indique le sens de la relation et la valeur absolue indique l'intensité de la relation ; dans notre cas plus rho est proche de 1, plus les données des relevés floristiques de 1979 et 2008-2009 sont liées.

Un coefficient de rémanence $R = 100 \times \frac{C}{D+C}$ qui indique la part d'espèces rémanentes en 2008-2009 par rapport aux espèces observées en 1979 et un coefficient de transformation $T = 100 \times \frac{A+D}{A+D+C}$ qui indique la proportion d'espèces différentes entre les deux relevés sur la totalité des espèces observées (Guillerm, 1978) ont été calculés.

5.3.3 Résultats

5.3.3.1 Coefficients de rémanence et coefficients de transformation (tableau 5.4)

Le coefficient de rémanence (R) est similaire pour les deux modalités : plus de la moitié des espèces présentes en 1979 le sont toujours 30 ans après. Le coefficient de transformation (T), d'environ 55%, est également similaire pour les deux modalités et repose principalement sur la part d'espèces disparues (D). Compte-tenu de la différence entre les étendues spatiales des relevés en 1979 et en 2008-2009, une partie des espèces disparues peut correspondre à des espèces non observées en 2008-2009 car non présentes dans la zone étudiée.

TABLE 5.4 – Coefficients de rémanence et de transformation des communautés d'adventices pour les parcelles travaillées et les parcelles entretenues par désherbage chimique

	Tilled plots	Non-tilled plots
<i>A</i> (Nouvelles)	22	17
<i>D</i> (Disparues)	36	35
<i>C</i> (Rémanentes)	47	44
$R = 100 \times \frac{C}{D+C}$	56.6	55.7
$T = 100 \times \frac{A+D}{A+D+C}$	55.2	54.2

5.3.3.2 Fréquences et abondances des espèces rémanentes

Pour l'entretien par travail du sol, il y a une corrélation positive entre les fréquences et les abondances des espèces pour les relevés réalisés en 1979 et ceux réalisés en 2008-2009. Les rho de Spearman valent 0.5 environ (tableau 5.5). Les espèces rémanentes présentes dans les parcelles entretenues par travail du sol ont donc des fréquences (graphe a) et des abondances (graphe c) qui ont peu évolué en 30 ans comme le montrent la figure 5.6. En revanche, les rho de Spearman pour la modalité non-culture sont proches de zéro ou négatif. Les espèces rémanentes des parcelles en non-culture ont donc changé de position au sein de la communauté. On voit sur la figure 5.6 (graphes b et d) que des espèces très fréquentes ou très abondantes en 1979 ne le sont plus en 2008-2009 et inversement certaines l'étaient peu et le sont devenues. Les espèces moins représentées aujourd'hui dans la communauté sont principalement des géophytes : *Muscari neglectum*, *Cynodon dactylon*, *Allium vineale*, *Allium polyanthum*, alors que les espèces plus représentées qu'auparavant sont plutôt des annuelles : *Poa annua*, *Setaria spp.*, *Crepis spp.*, *Picris spp.*

TABLE 5.5 – Coefficients de Spearman

	Tilled plots	Non-tilled plots
Frequency	0.56	-0.11
Abundance	0.42	0.09

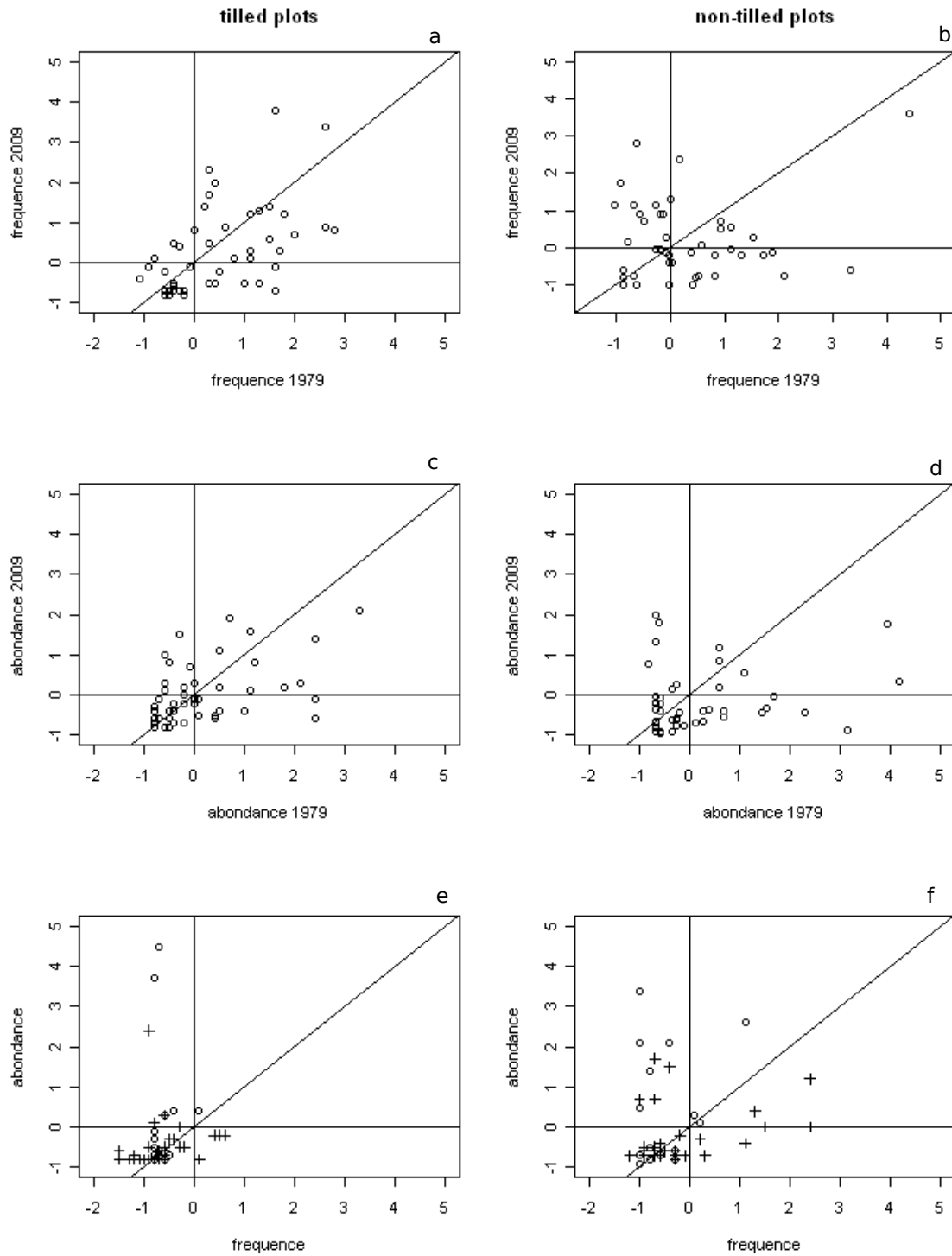


FIGURE 5.6 – Comparaison des fréquences (graphes a et b) et des abondances (graphes c et d) centrées et réduites des espèces rémanentes pour les parcelles travaillées et entretenues par désherbage chimique entre les relevés de 1979 et 2008-2009. Situation dans la communauté floristique en terme de fréquence et abondance des espèces disparues (+) et nouvelles (o) pour les parcelles travaillées et entretenues par désherbage chimique (graphes e et f).

5.3.3.3 La transformation des communautés

La figure 5.6 (graphes e et f) montre la position au sein de la communauté floristique des espèces disparues et nouvelles pour les deux modalités d'entretien du sol. Dans le cas des parcelles entretenues par travail du sol, on constate que les espèces disparues et nouvelles sont très majoritairement des espèces peu fréquentes et peu abondantes. Dans le cas de la non-culture, certaines espèces disparues étaient bien présentes dans la composition floristique comme *Rubia peregrina*, *Chondrilla juncea*, *Sanguisorba minor* ou *Sedum sediforme*. Ces espèces sont toutes des vivaces. Des espèces nouvelles bien représentées dans la communauté sont réciproquement absentes de la composition floristique de 1979 : *Medicago spp.* et de manière moins significative *Tragus racemosus*. Ces espèces sont toutes deux des annuelles.

5.3.4 Discussion et conclusion

En étudiant l'évolution de la flore à 3 et 5 ans, Maillet (1992) avait observé deux tendances : des systèmes de non-culture plutôt stables avec des apparitions de nouvelles espèces au cours du temps et des systèmes en travail du sol plutôt instables d'une année à l'autre mais avec des variations internes à une banque d'espèces présentes à l'échelle régionale.

Dans notre étude les relevés sont espacés de 30 ans et l'étendue spatiale d'observation en 2008-2009 était plus réduite, par conséquent le potentiel d'observation est également limité. Dans cette situation, les coefficients de rémanence et de transformation calculés associés à la part minoritaire de transformation par apparition de nouvelles espèces, indique une certaine stabilité des systèmes sur le long terme, particulièrement pour les systèmes en travail du sol.

En effet, pour ce système, les espèces rémanentes ont conservé leur place dans la communauté en termes de fréquence et d'abondance. Quant aux espèces disparues ou nouvelles, ce sont quasiment toutes des espèces faiblement répandues et peu abondantes. Bien que les outils de travail du sol aient changé, les rythmes d'intervention au champ ont peu évolué. Miles (1986) a indiqué que la régularité des façons culturales a favorisé la sélection d'espèces à cycle en adéquation avec le rythme des perturbations que l'on pourrait qualifier de « dérangement ». Nos résultats semblent confirmer cette analyse.

En ce qui concerne les systèmes en désherbage chimique, là aussi les rythmes d'application de produits ont peu changé. Cependant les herbicides très largement utilisés en 1979, ne le sont plus en 2008-2009. C'est d'ailleurs cette modification des molécules utilisées qui explique les modifications dans la communauté des espèces. La simazine et l'aminotriazole permettaient de bien éliminer les espèces annuelles mais les espèces vivaces, libérées de la compétition avec les espèces annuelles ont connu un important développement. Les molécules utilisées actuellement permettent de mieux éliminer les vivaces mais certaines annuelles se sont bien adaptées au rythme d'application des herbicides et se développent en période automnale comme *Poa annua* ou *Crepis spp.* et par ailleurs, certaines espèces ont développé des résistances et sont donc observées en période printanière comme *Setaria spp.*

En conclusion, on peut considérer que les communautés d'espèces adventices sont dans les systèmes en travail du sol, peu soumis à des changements sur le long terme si les rythmes d'intervention sont stables. Pour les systèmes en désherbage chimique, les changements de communautés semblent principalement liés aux changements de molécules herbicides et peu à l'apparition d'espèces nouvelles. On fait donc l'hypothèse que les observations de l'année 2008-2009 sont exploitables pour des représentations de l'agro-écosystème sur différents cycles culturaux tant que les molécules d'herbicides utilisées par les viticulteurs sont les mêmes que celles utilisées en 2008-2009.

5.4 Conclusion sur la structure des communautés d'espèces adventices

Les études spatiales et temporelles des communautés floristiques montrent qu'à l'échelle d'un bassin versant moyen, la composition floristique dans un lieu donné est définie par un ensemble de contraintes (saison, sol, entretien du sol) parmi lesquelles celles d'origine anthropique sont majeures. Deux facteurs déterminent conjointement les communautés : (i) la modalité de destruction du couvert, (ii) le rythme de destruction du couvert. A l'échelle des territoires étudiés, il existe donc une interaction forte entre la répartition spatio-temporelle des actions d'entretien du sol et les communautés floristiques d'espèces adventices.

On va donc utiliser ces résultats pour modéliser le développement de la couverture herbacée dans le chapitre suivant : les espèces dont la croissance est modélisée pour une zone donnée dépendra (i) de la saison ; (ii) de la modalité d'entretien du sol parmi les trois étudiées (travail du sol seul, désherbage chimique seul et combinaison des deux) ; (iii) du type de sol. Pour ce dernier facteur, compte tenu des résultats obtenus, 3 groupes sont constitués en fonction de leur impact sur les communautés préalablement définies par les 2 autres facteurs (saison et entretien du sol) : (i) les sols à pH acides ; (ii) les sols hydromorphes ; (iii) les autres types de sols.

Remerciements

Je tiens à remercier Elena Kazakou pour son aide et sa participation à l'ensemble de ce travail. Merci à Guillaume Coulouma pour tout ce qui a touché à la pédologie, pour le terrain comme pour l'analyse. Merci à Jean-Luc Belotti pour sa participation active aux relevés floristiques. Merci à Jean Richarte pour l'aide à la reconnaissance des espèces et ses conseils. Merci à Jacques Maillet pour son aide précieuse concernant la réalisation de l'étude temporelle sur la base de ses données. Merci à Patrick Andrieux pour son appui.

Bibliographie

- Albergel, J., Ribstein, P., & Valentin, C. (1985). L'infiltration : quels facteurs explicatifs ? *Journal Hydrologique de l'ORSTOM à Montpellier*, (pp. 25–48).
- Andreasen, C., Streibig, J., & Haas, H. (1991). Soil properties affecting the distribution of 37 weed species in danish fields. *Weed Research*, 31(4), 181–187.
- Barralis, G. (1976). Méthode d'étude des groupements adventices des cultures annuelles ; application à la côte d'or. In *5ème coll. Inter Biol., Ecol. & Syst. des mauvaises herbes* (pp. 59–68). Dijon.
- Basu, C., Halfhill, M. D., Mueller, T. C., & Jr, C. N. S. (2004). Weed genomics : new tools to understand weed biology. *Trends in Plant Science*, 9(8), 391–398.
- Baumgartner, K., Steenwerth, K. L., & Veilleux, L. (2008). Cover-Crop systems affect weed communities in a california vineyard. *Weed Science*, 56(4), 596–605.
- Bernal, J. (1988). *Impact de différents types de perturbations sur le comportement phénologique et génétique de populations de Convolvulus arvensis L. Application aux effets des techniques culturales de la vigne*. PhD thesis, USTL, Montpellier.
- Beuret, E. (1981). Flore des talus dans les vignes en banquettes en suisse romande. *Revue Suisse de Viticulture Arboriculture Horticulture*, 13(2), 85–88.
- Braak, C. T. & Prentice, I. (1988). A theory of gradient analysis. *Advances in Ecological Research*, 18, 271–317.
- Coulouma, G. (2008). Carte des sols de la basse vallée de la peyne. echelle 1 :25000. notice. UMR LISAH, montpellier.
- Coulouma, G., Barthès, J., & Robbez-Masson, J. (2008). Carte des sols de la basse vallée de la peyne. 55 km². echelle 1 :25000. UMR LISAH, montpellier.
- Espirito-Santo, M., Guillerm, J., Moreira, I., Ribeiro, J., Lopes, M., & Barata, A. (1990). Infestantes da vinha em portugal. distribuicao e importancia agricola. *Phytoma Espana*, 23, 55–58.
- Fried, G., Norton, L., & Reboud, X. (2008). Environmental and management factors determining weed species composition and diversity in france. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 128(1-2), 68–76.
- Gago, P., Cabaleiro, C., & Garcia, J. (2007). Preliminary study of the effect of soil management systems on the adventitious flora of a vineyard in northwestern spain. *Crop Protection*, 26(4), 584–591.

- Guillerm, J. (1978). *Sur les états de transition dans les phytocénoses post-culturelles*. Thèse doctorat d'état es sciences, USTL, Montpellier.
- Hubert, D., USTL, & Centre d'études phytosociologiques et écologiques Louis Emberger (1978). *Evaluation du rôle de la végétation des parcours dans le bilan écologique et agro-économique des Causses*. Technical report, Université des sciences et techniques du Languedoc.
- Ihaka, R. & Gentleman, R. (1996). R : A language for data analysis and graphics. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 5(3), 299–314.
- Kenkel, N. C., Derksen, D. A., Thomas, A. G., & Watson, P. R. (2002). Review : Multivariate analysis in weed science research. *Weed Science*, 50(3), 281–292.
- Legendre, P. & Legendre, L. (1998). *Numerical Ecology*. 2nd ed. Amsterdam, elsevier edition.
- Légère, A., Stevenson, F., & Benoit, D. (2005). Diversity and assembly of weed communities : contrasting responses across cropping systems. *Weed Research*, 45(4), 303–315.
- Maillet, J. (1981). *Evolution de la flore adventice dans le Montpellierais sous la pression des techniques culturales*. Thèse DDI, écologie, USTL, Montpellier.
- Maillet, J. (1992). *Constitution et dynamique des communautés de mauvaises herbes des vignes de France et des rizières de Camargue*. Thèse d'état, USTL, Montpellier.
- Mas, M. T., Poggio, S. L., & Verdú, A. M. (2007). Weed community structure of mandarin orchards under conventional and integrated management in northern Spain. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 119(3-4), 305–310.
- Miles, J. (1986). Vegetation succession : past and present perceptions. In *Colonisation, succession and stability* (pp. 1–29). Oxford : Gray A.J., Crawley M.J. & Edwards P.J. (eds.), blackwell sci. pub. edition.
- Mueller-Dombois, D. & Ellenberg, H. (1974). Causal analytical inquiries into the origin of plant communities. In *Aims and Methods of Vegetation Ecology* (pp. 335–370). New York : Mueller-Dombois, D., Ellenberg, H. (Eds.), John Wiley & Sons edition.
- Oksanen, J., Blanchet, F., Kindt, R., Legendre, P., O'Hara, R., Simpson, G., Solymos, P., Henry, M., Stevens, H., & Wagner, H. (2010). *vegan : Community ecology package*. R package. version 1.17-5.
- Raunkiaer, C. (1934). *The Life Forms of Plants and Statistical Plant Geography*. Oxford, England, Clarendon Press edition.
- Spearman, C. (1904). The proof and measurement of association between two ranks. *American Journal of Psychology*, 15, 72–101.

Chapitre 6

Développement de la végétation spontanée après travail du sol ou désherbage chimique : II Modélisation de la germination et de la croissance

Sommaire

6.1	Introduction	185
6.2	Matériel et méthodes	187
6.2.1	Modélisation de l'émergence	187
6.2.1.1	Les trois processus de l'émergence	187
6.2.1.2	Le choix de modéliser la germination	188
6.2.1.3	Le modèle de temps hydrothermal pour la germination	188
6.2.1.4	Une approche simplifiée de paramétrisation du modèle	188
6.2.1.5	Les hypothèses sur la dormance des adventices (figure 6.2)	189
6.2.2	Modélisation de la croissance	190
6.2.2.1	Le modèle de conductance pour la croissance	190
6.2.2.2	De la plante au couvert herbacé de la rangée	191
6.2.3	Effets des actions d'entretien du sol sur le couvert herbacé (figure 6.3)	192
6.2.4	Contrôle de cohérence de la modélisation de la dynamique du couvert herbacé	193
6.3	Résultats	194
6.3.1	Paramétrisation des modèles de germination et de croissance	194
6.3.2	Dynamiques de couverture herbacée pour différentes modalités d'entretien du sol	195
6.4	Discussion et conclusion	197

Chapitre 6

Développement de la végétation spontanée après travail du sol ou désherbage chimique : II Modélisation de la germination et de la croissance

6.1 Introduction

Dans le cadre de la représentation de l'évolution de l'infiltrabilité, on souhaite représenter les variations spatio-temporelles de la couverture herbacée du sol. On sait également que la prévision de l'état de cette couverture est importante en tant qu'indicateur pour les décisions techniques des agriculteurs. Par conséquent, cette partie s'attache à présenter la modélisation de la dynamique de la couverture herbacée par les adventices dans les parcelles en fonction des actions des viticulteurs. On se limite à la représentation de la dynamique de la végétation spontanée sur les zones non entretenues par enherbement permanent car elles présentent des changements importants de couverture herbacée au cours de l'année et donc d'infiltrabilité du sol. A contrario l'infiltrabilité est stable sur un sol couvert à plus de 50% par la végétation herbacée (Andrieux et al., 2001). De plus, on ne cherche pas à représenter les actions des viticulteurs pour la gestion de ces zones enherbées (tonte, semis,...). En effet, ces travaux sont soit peu fréquemment réalisés dans la zone d'étude, soit ils n'ont pas d'influence sur l'état du milieu en termes hydrologiques (ni directement, ni indirectement par concurrence avec d'autres travaux). L'évolution de la couverture herbacée pour les zones enherbées n'est donc pas un indicateur nécessaire à modéliser.

La modélisation de la couverture herbacée à l'échelle de la rangée doit intégrer l'effet des actions culturales sur la dynamique des adventices. Pour répondre aussi bien aux besoins des processus hydrologiques qu'à ceux pour la gestion technique, cette dynamique doit être représentée à l'échelle du cycle cultural avec une résolution journalière, car la journée est l'unité de temps pour le pilotage technique, et à l'échelle de l'agrosystème avec une résolution au niveau de la rangée.

Dans le chapitre précédent on a montré qu'il existait, dans les parcelles, une diversité de communautés floristiques dépendantes (i) du type d'entretien du sol effectué dans la rangée, (ii) du type de sol et (iii) de la saison. Les espèces principales pour chaque type d'entretien du sol et chaque type de sol ont été identifiées par saison. La diversité floristique crée inéluctablement une diversité de dynamiques, par conséquent, on va chercher à prendre en compte cette

diversité floristique dans notre modélisation. Par ailleurs, la comparaison des communautés floristiques à l'échelle de l'agrosystème avec des données d'il y a 30 ans nous a montré que la structure des communautés avait peu évolué dans le cas des sols travaillés. Les changements observés pour les sols désherbés chimiquement semblent, quant à eux, principalement liés aux changements des molécules des herbicides. En conséquence, on ne s'attachera pas à représenter l'évolution pluri-annuelle des communautés et donc la constitution du stock de graines. On fait l'hypothèse, dans le cadre de la représentation de pratiques culturales stabilisées, que la structure de la communauté floristique n'est pas modifiée d'une année à l'autre pour un entretien du sol donné. Finalement, comme la dynamique des populations à long terme n'est pas considérée et que la dynamique d'un couvert herbacé supérieur à 50% a peu d'impacts sur les processus de transferts de polluants par ruissellement, on limitera la modélisation aux développements précoces des adventices jusqu'à la formation d'un couvert conséquent du sol mais on ne cherchera pas à modéliser des stades plus évolués des plantes comme la floraison ou l'épiaison.

En résumé, compte tenu de nos échelles de modélisation et de nos hypothèses, on va donc s'intéresser particulièrement à la dynamique des développements précoces des adventices au cours d'un cycle cultural en fonction de la saison et des actions culturales d'entretien du sol.

Les études des dynamiques de population des adventices en milieux cultivés sont majoritairement structurées autour du cycle de vie des plantes avec des applications le plus souvent limitées pour l'aide à la décision stratégique (Holst et al., 2007). Les modèles proposés dans ce cadre ont alors des objectifs d'appui au pilotage agronomique (e.g. Decid'Herb - Munier-Jolain et al., 2005) ou au pilotage économique-stratégique (e.g. GWM - Wiles et al., 1996), ils s'appuient majoritairement sur des bases de données non accessibles à l'utilisateur du modèle et considèrent rarement l'effet des facteurs climatiques sur la dynamique des développement des adventices. D'autres modèles, certains mécanistes (e.g. ALOMYSIS - Colbach et al., 2006), intègrent mieux l'effet climatique sur le développement des plantes et explicitent mieux les processus représentés, cependant ces modèles utilisent beaucoup de paramètres et ont donc été développés pour des espèces modèles ou ne concernent que des plantes cultivées (e.g. STICS - Brisson et al., 1998). Pour mettre en oeuvre de tels modèles, il faudrait donc avoir accès à des valeurs de paramètres difficiles voire impossibles à trouver dans la littérature car rarement mesurés sur des espèces adventices autres que les espèces modèles (Gardarin et al., 2010).

Les modèles applicatifs rencontrés dans la littérature n'étant pas adaptés à nos objectifs de modélisation, on s'est penché sur les approches de modélisation des deux principaux processus à représenter : l'émergence et la croissance précoce des adventices. Dans sa revue de littérature, Grundy (2003) indique deux grandes voies de modélisation de l'émergence : l'approche empirique basée sur des observations et l'approche mécaniste basée sur les processus. L'approche empirique par les observations qu'elle exige et son indépendance aux facteurs climatiques ne peut convenir pour notre étude. On a donc choisi une modélisation de type mécaniste basée sur la physiologie des plantes. Les mêmes voies existent pour la modélisation de la croissance. L'approche empirique sur des observations permet de constituer des modèles simples basés sur le seul cumul de degrés-jour. Cependant, pour les adventices, ces observations sont rares, d'autant plus si elles doivent correspondre à notre zone agro-climatique. Par conséquent, on a également choisi, pour la croissance, une voie de modélisation basée sur la physiologie.

6.2 Matériel et méthodes

On présente dans la suite les processus que l'on a cherché à modéliser, la raison de ces choix et la méthode mise en oeuvre. Puis dans un deuxième temps, on présente la méthode pour le contrôle expérimental des modèles.

6.2.1 Modélisation de l'émergence

La figure 6.1 présente les variables cibles associées à la prédiction de l'émergence d'une graine (Allen, 2003).

6.2.1.1 Les trois processus de l'émergence

Trois processus majeurs composent l'émergence : la levée de dormance, la germination et la croissance des jeunes organes avant l'émergence.

La dormance, c'est à dire l'absence de germination d'une graine viable soumise à des conditions non optimales (Hilhorst et Toorop, 1997), influe sur le nombre de graines capables de germer à un moment donné et donc sur l'importance et l'étalement temporel de l'émergence. Différents modèles basés sur la température du sol et/ou l'humidité du sol proposent de modéliser l'induction et la perte de dormance (e.g. Bouwmeester et Karssen, 1993 ; Bauer et al., 1998 ; Benech-Arnold et Batlla, 2000).

La germination pour une graine non dormante dépend de la température et de l'humidité du sol. L'approche de modélisation la plus courante de ce processus est le concept de modèle de temps hydrothermal qui combine le temps thermique basé sur une température de base et le temps hydrique basé sur un potentiel hydrique de base (Gummerson, 1986).

La croissance avant émergence correspond à l'élongation du radicule. Peu de modèles non empiriques existent pour ce processus pour les espèces non cultivées. Un seul modèle, qui a étudié trois espèces, est cité par Grundy (2003) dans sa revue de littérature. Il se base sur la résistance du sol, la profondeur d'enfouissement de la graine, le poids de la graine et la température (Vleeshouwers, 1997).

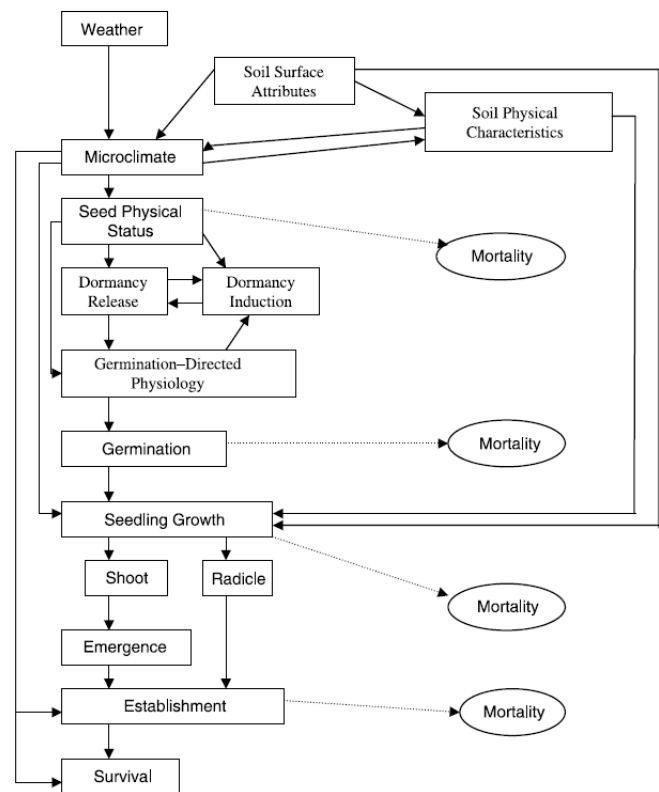


FIGURE 6.1 – Processus d'émergence d'une graine

6.2.1.2 Le choix de modéliser la germination

Pour modéliser l'émergence des adventices nous nous sommes focalisés sur la modélisation du processus de germination. En effet, les travaux mettant en oeuvre le modèle de temps hydrothermal sont nombreux et pouvaient permettre de le paramétrer pour les espèces observées sur notre zone sans avoir à réaliser des mesures en laboratoire qui n'étaient pas réalisables dans le cadre de la thèse. Par conséquent, les deux autres processus n'ont pas été modélisés formellement. Nous avons fait des hypothèses simples pour définir la période de dormance des plantes en nous appuyant sur leur physiologie et sur les périodes auxquelles elles ont été observées sur le terrain. Quant à la croissance avant l'émergence, nous ne l'avons pas représentée. Pour prendre en compte l'effet de ces processus sur la densité des plantes qui émergent, plutôt que de chercher à représenter les taux de mortalité ou de non levée de dormance à chaque étape du développement de la graine, nous avons considéré que la densité de graines d'une espèce donnée était la densité effective de plantes émergées de cette espèce.

6.2.1.3 Le modèle de temps hydrothermal pour la germination

Le modèle de temps hydrothermal (HTT) de Gummerson (1986) est une extension du concept de somme de température. Selon ce concept, une plante commence à germer quand la somme des différences entre la température moyenne quotidienne et sa température de base passe un seuil. Le modèle HTT étend ce concept à l'accumulation de potentiel hydrique par degré-jour. Par conséquent, les graines germent quand elles ont été soumises à des températures et des humidités suffisantes. Le temps hydrothermal (θ_{HT}) correspond ainsi à la somme au cours du temps des produits des différences de températures (T_{soil}) et de potentiel hydrique du sol (ψ_{soil}) par rapport à leurs valeurs de bases respectives (T_{min} , ψ_{min}) :

$$\theta_{HT} = \sum [(\psi_{soil} - \psi_{min})(T_{soil} - T_{min})] \quad (6.1)$$

avec $\psi_{soil} > \psi_{min}$ et $T_{soil} > T_{min}$.

Le temps hydrothermal (θ_{HT}) et la température de base (T_{min}) sont considérés constants au cours du temps pour une espèce alors que le potentiel hydrique de base (ψ_{min}) est considéré normalement distribué dans une population de graines (Meyer et al., 2000) avec une moyenne ψ_{min50} et un écart-type $\sigma(\psi_{min})$. Par conséquent l'équation ci-dessus a été transformée par Bradford (1995) :

$$probit(g_t) = \frac{(\frac{\sum \psi_{soil} - \psi_{min50}}{t} \frac{\theta_{HT}}{t(T_{soil} - T_{min})})}{\sigma(\psi_{min})} \quad (6.2)$$

avec g_t la proportion de graines germées au jour t numéroté à partir de la levée de dormance, le probit étant l'inverse de la fonction de distribution cumulative normale.

6.2.1.4 Une approche simplifiée de paramétrisation du modèle

L'utilisation du modèle de temps hydrothermal nécessite donc d'évaluer quatre paramètres pour chaque espèce : θ_{HT} , ψ_{min50} , T_{min} et $\sigma(\psi_{min})$. Ces paramètres et particulièrement θ_{HT} et $\sigma(\psi_{min})$ sont difficiles à trouver dans la littérature pour les espèces d'adventices. De plus, s'ils ne sont pas disponibles, ils doivent être déterminés par des régressions répétées basées sur des expérimentations de germination réalisées avec différentes combinaisons de facteurs (humidité et température). Pour pallier cette difficulté de paramétrisation du modèle, Köchy et Tielbörger (2007) ont proposé une approche simplifiée de paramétrisation et l'ont testée sur

36 espèces annuelles d'adventices méditerranéennes. C'est cette approche que nous avons mise en oeuvre.

Leur approche consiste à limiter les paramètres inconnus à deux. Ils suggèrent que la température de base T_{min} ainsi que l'écart-type du potentiel hydrique minimal $\sigma(\psi_{min})$ peuvent être estimés par expertise ou par comparaison. À partir de là, une seule expérimentation de germination (qui fournit un taux de germination au cours du temps en conditions thermique et hydrique contrôlées) permet de résoudre l'équation et d'évaluer les deux paramètres restants : θ_{HT} , ψ_{min50} .

Les auteurs proposent également un test pour vérifier la pertinence de la valeur de l'écart-type de potentiel de base $\sigma(\psi_{min})$ estimée ou extrapolée. Ils utilisent le ratio θ_{HT}/t_{50} (avec t_{50} , le temps hydrothermal pour atteindre 50% de germination) qui est considéré comme indépendant de $\sigma(\psi_{min})$ car $\text{probit}(50\%)=0$. Par conséquent en conditions environnementales constantes :

$$\theta_{HT}/t_{50} = (\psi_{soil} - \psi_{min50})(T_{soil} - T_{min})$$

Les auteurs indiquent que ce ratio est plus similaire entre espèces que ne l'est l'écart-type du potentiel hydrique minimal du sol. Donc si une espèce possède un ratio qui diffère significativement de ceux des autres espèces c'est que l'écart-type de potentiel hydrique de base utilisé pour calculer le temps hydrothermal θ_{HT} n'était pas correct. Dans ce cas, Köchy et Tielbörger (2007) ont recalculé le temps hydrothermal en utilisant la moyenne du ratio θ_{HT}/t_{50} puis ils ont ajusté un nouvel écart-type : $\sigma_{adjusted} = \theta_{new}/\theta_{old}\sigma_{old}$.

Pour mettre en oeuvre cette approche, nous avons cherché dans la littérature les valeurs de température de base T_{min} pour les différentes espèces principales identifiées. L'étude de Köchy et Tielbörger (2007) portant sur des espèces méditerranéennes, nous avons repris la valeur de l'écart-type du potentiel hydrique de base $\sigma(\psi_{min})$ qu'ils ont utilisé (0.345). Puis nous avons cherché dans la littérature des expériences de germination pour résoudre l'équation et déterminer les paramètres θ_{HT} et ψ_{min50} . On a choisi des expériences de germination pour lesquelles la température et l'humidité étaient constantes. On a exclu les expériences réalisées à des températures trop basses car elles ne parvenaient pas à des taux de germination supérieurs à 50%. Finalement, nous avons effectué le test de contrôle proposé par les auteurs en cherchant les valeurs des t_{50} des espèces dans la littérature (si la valeur n'était pas donnée pour l'expérience de germination précédemment sélectionnée) et en utilisant comme base de comparaison l'ensemble des valeurs des ratios θ_{HT}/t_{50} pour les espèces qu'ils ont étudiées.

6.2.1.5 Les hypothèses sur la dormance des adventices (figure 6.2)

Selon des informations de la littérature qui indiquent que la levée de dormance est liée aux premières grosses pluies de l'automne, on définit que la levée de dormance des espèces observées en période automnale a lieu quand le cumul de pluie sur une fenêtre temporelle de 36h dépasse les 30 mm. On ne représente pas explicitement la levée de dormance des espèces printanières : on considère que la première destruction du couvert après le 1er février réalise la transition entre les espèces à germination automnale et les espèces à germination printanière. À cette occasion, le taux de germination d'une espèce est mis à zéro. En conséquence, si une espèce est présente aux deux saisons, on représente un cycle de germination pour chacune des deux saisons. Finalement, on définit une induction de la dormance sur les espèces printanières en stoppant la dynamique de la germination si la température moyenne dépasse les 25°C pendant au moins deux jours consécutifs après le 1er juin.

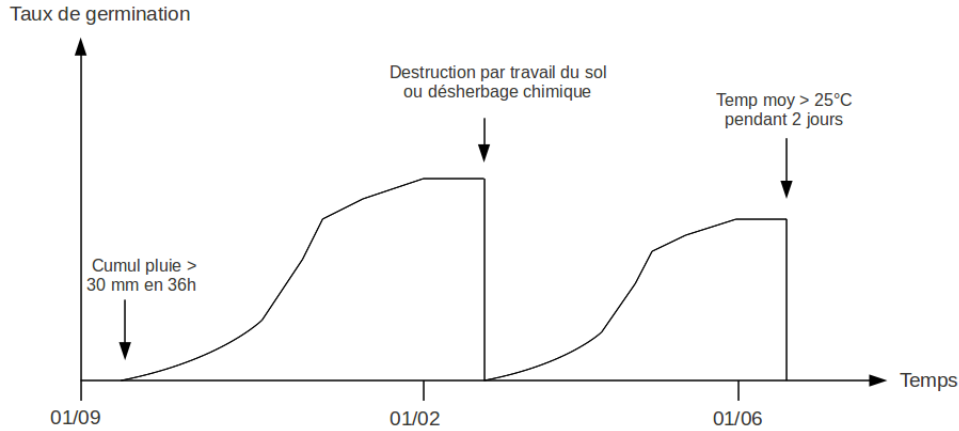


FIGURE 6.2 – Représentation de l’effet de la dormance sur la germination des adventives

6.2.2 Modélisation de la croissance

La modélisation de la croissance précoce des plantes avec une approche de type mécaniste se base sur des concepts proches de ceux du modèle de temps hydrothermal pour la germination : on s’appuie sur des différences entre la valeur quotidienne d’un paramètre climatique et sa valeur de base pour la croissance de la plante. Par rapport au modèle de germination, le paramètre climatique ‘potentiel hydrique du sol’ cède sa place au rayonnement qui influe sur la photosynthèse. La température demeure intégrée dans les modèles comme un facteur influent. L’approche de modélisation la plus courante se base sur le concept de la conductance.

6.2.2.1 Le modèle de conductance pour la croissance

Le modèle de conductance est un modèle mécaniste simple qui requière un nombre limité de paramètres assez aisés à recueillir et qui permet de modéliser aussi bien la croissance de plantes en situation mono ou multi-espèces (Aikman et Scaife, 1993). Comme pour le modèle de temps hydrothermal, le modèle de conductance est une extension du concept de somme de température. Le temps hydrothermal est ici traduit par le concept de degrés-jours effectifs (effective day degrees, *EDD*) (Scaife et al., 1987 ; Aikman et Scaife, 1993) qui prennent en compte le cumul de température et de radiation. Ajouter l’effet croisé des deux facteurs limitants (lumière et température) sur la croissance est analogue à quantifier les résistances dans un circuit électrique : la conductance équivalente à la combinaison ne peut excéder le plus petit des deux composants. Les degrés jours effectifs (*EDD*) sont calculés ainsi :

$$EDD = \frac{1}{[(T - T_b)]^{-1} + q\phi I^{-1}} \quad (6.3)$$

avec T la température moyenne de l’air ($^{\circ}\text{C}$), T_b la température de base pour la croissance ($^{\circ}\text{C}$), I le flux incident journalier de radiation photosynthétique active ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$), q un coefficient de pondération de l’influence de la lumière relativement à celle de la température ($\text{g g}^{-1} \text{MJ m}^{-2} \text{C}^{-1}$) qui est déterminé en résolvant l’équation de la croissance qui utilise l’*EDD* comme variable d’entrée pour le calcul du poids sec et ϕ un facteur de l’efficacité de l’interception de la radiation par unité de surface de feuille.

La croissance est une fonction exponentielle :

$$\ln(w) = \ln(w_0) + RGR \sum EDD \quad (6.4)$$

avec w le poids sec (g), w_0 le poids sec initial à l'émergence et RGR le taux de croissance relatif (Relative Growth Rate) (EDD^{-1}).

Nous avons utilisé les équations proposées dans la revue de Benjamin et Park (2007) pour calculer quotidiennement le gain en poids sec et la couverture herbacée. Ils proposent deux voies de calcul selon que la canopée est fermée ou non, ce qui dans le premier cas permet de prendre en compte la concurrence entre espèces. Comme nous avons indiqué que la dynamique d'un couvert installé ne serait pas prise en compte, nous avons utilisé la partie du modèle de conductance pour les cas de canopée « ouverte ».

Le modèle pour une plante d'une espèce est le suivant :

$$\ln(w) = \ln(w_0) + RGR \sum EDD = \frac{1}{[(T - T_b)]^{-1} + s_z f_z I^{-1}} \quad (6.5)$$

avec s_z l'étendue de la couronne foliaire (crown zone area) (m^2) et f_z la fraction de lumière interceptée par le feuillage dans la zone s_z

$$s_z = Aw^{2/3}$$

avec A une constante allométrique (Aikman et Watkinson, 1980) ($m^2 g^{-1}$)

$$f_z = 1 - \exp(-kL_z)$$

avec k , le coefficient d'extinction

et L_z un index de surface de feuille à l'intérieur de la zone s_z (Aikman et Benjamin, 1994)

$$L_z = \frac{LARw}{s_z}$$

avec LAR (Leaf Area Ratio) une caractéristique morphologique de la plante ($m^2 leaf g^{-1} total dry weight$)

Pour évaluer la couverture herbacée du sol par une plante on remet à jour s_z après avoir calculé le gain en poids sec journalier.

Les paramètres A et k sont considérés identiques pour toutes les espèces : $A = 0.035$ et $k = 0.62$. La température de base est par défaut la même que celle pour la germination sauf si une température de croissance a été trouvée dans la littérature.

Pour mettre en oeuvre ce modèle, nous avons donc cherché dans la littérature deux paramètres pour chaque espèce : RGR et LAR . Les valeurs des gains journaliers en poids, RGR , pour être exprimées dans la bonne unité doivent soit avoir été optimisées pour ce modèle de conductance ou doivent être calculées à partir d'expérimentations de croissance en conditions contrôlées : en connaissance du LAR , de la température, de la radiation journalière et de l'évolution du poids sec on résoud l'équation du modèle pour déterminer le paramètre RGR . Si les valeurs n'ont pas pu être trouvées pour une espèce donnée, on les a extrapolées à partir d'espèces proches en terme de structure spatiale du feuillage.

6.2.2.2 De la plante au couvert herbacé de la rangée

Le modèle présenté ci-dessus permet de calculer la dynamique de couverture du sol par une plante d'une espèce donnée à partir de son émergence. Pour modéliser la dynamique du couvert herbacé d'une rangée dans une parcelle de vigne on doit donc représenter la dynamique de croissance de chaque plante de chaque espèce. Pour ce faire, pour chaque espèce on calcule indépendamment la dynamique de croissance de chaque cohorte, une cohorte correspondant à l'ensemble des plantes qui ont émergé le même jour. C'est à dire que, pour une espèce donnée,

quand le taux de germination augmente, on définit une nouvelle cohorte. Comme pour les processus d'émergence, on ne prend pas en compte le taux de mortalité lors du processus de croissance. La densité de graines de chaque espèce correspond à la densité observée sur le terrain. Finalement, pour connaître la couverture herbacée du sol à un moment donné on fait donc la somme de la couverture de toutes les cohortes de toutes les espèces présentes sur la rangée.

6.2.3 Effets des actions d'entretien du sol sur le couvert herbacé (figure 6.3)

Pour déterminer l'effet des actions d'entretien du sol sur la dynamique du couvert herbacé on s'est basé sur les observations réalisées sur le terrain et des éléments de la littérature. On fait l'hypothèse que les actions n'ont d'effet que sur le niveau de couverture herbacée via la destruction et la croissance des adventices (qu'elle soit pré ou post-émergence). Par conséquent, aucun effet n'est répercuté sur la germination : le taux de germination est réévalué quotidiennement pour une espèce donnée quoi qu'il arrive et n'est remis à zéro que lorsqu'on change de saison. Les actions peuvent donc détruire le couvert ou empêcher la croissance mais pas modifier la dynamique de la germination.

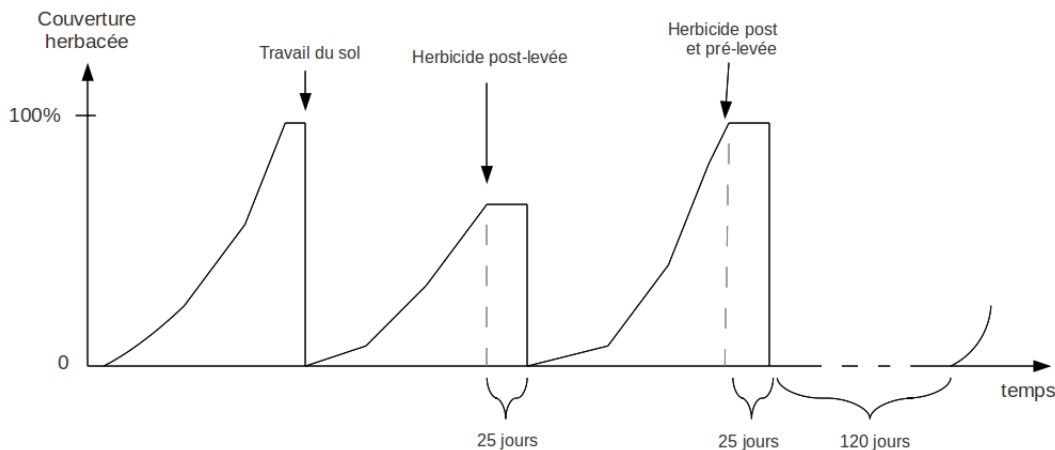


FIGURE 6.3 – Effets modélisés des actions d'entretien du sol sur le couvert herbacé

On considère que le travail du sol détruit totalement la couverture herbacée. Par conséquent la croissance repart de zéro : toutes les cohortes sont effacées et on en reconstruit de nouvelles pour chaque espèce dont le taux de germination augmente après le travail du sol.

On considère que l'application d'herbicide de post-levée possède un effet retard sur la couverture herbacée. En effet, lors d'observations sur le terrain, on a pu constater que le couvert ne se transforme que progressivement en litière et on a pu évaluer que la destruction du couvert existant n'était vraiment effective que 20 à 30 jours après l'application d'herbicide. Par conséquent la remise à zéro du couvert herbacé n'est effectuée que 25 jours après la date du désherbage chimique. Pendant les 25 jours d'incubation de l'herbicide, les cohortes présentes lors de l'application de l'herbicide voient leur croissance mise en veille (le couvert est maintenu au même niveau). Bien que l'on considère que l'herbicide de post-levée n'a pas d'effet sur les graines non émergées au moment de son application, on ne représente pas pendant les 25 jours d'incubation, l'éventuelle croissance de ces graines.

Dans le cas des applications d'herbicide de pré-levée associé à un herbicide de post-levée, on applique le même effet retard de 25 jours pour la destruction du couvert. Le couvert est remis à zéro après 25 jours puis on considère que la croissance est impossible (du fait de l'impossibilité de croissance pré-émergence créée par l'herbicide de pré-levée) pendant 120 jours. Cette durée est une durée moyenne de rémanence des herbicides de pré-levée exprimée par les viticulteurs de la zone étudiée.

6.2.4 Contrôle de cohérence de la modélisation de la dynamique du couvert herbacé

Pour évaluer la modélisation de la dynamique du couvert herbacé, un contrôle a été mené par expertise de la cohérence des résultats. Pour ce faire, on a défini un itinéraire technique d'entretien du sol pour chacune des trois modalités d'entretien du sol couramment observées sur la zone d'étude à l'échelle de la rangée et pour lesquelles on a réalisé des observations sur les communautés floristiques :

- l'entretien par travail du sol seul ;
- l'entretien par désherbage chimique seul ;
- l'entretien par désherbage chimique associé à du travail du sol.

Les itinéraires techniques sont présentés dans le tableau 6.1. Ils ont été déterminés à partir des observations et enquêtes réalisées sur le bassin versant de Roujan entre 2002 et 2007. Ce sont des itinéraires techniques correspondant à un cycle cultural qui commence à partir de la fin des vendanges soit du 1er septembre de l'année n au 31 août de l'année $n+1$.

TABLE 6.1 – Itinéraires techniques simulés pour le contrôle expérimental de la modélisation de la couverture herbacée dans les vignes

Itinéraire technique	Travail du sol d'automne	Désherbage chimique	Travail du sol de reprise	Travail du sol de printemps
Travail du sol	15 octobre	-	14 avril	05 juin
Désherbage chimique	-	07 avril ^a	-	-
Combinaison travail du sol et désherbage chimique	15 octobre	07 avril ^b	-	05 juin

^aapplication d'une association d'herbicides de pré et de post-levée ; ^bapplication d'herbicides de post-levée

Pour l'itinéraire technique « désherbage chimique », on considère que l'application inclue un herbicide de post-levée et un herbicide de pré-levée alors que pour l'itinéraire technique « combinaison de désherbage chimique et travail du sol », l'herbicide appliqué est de type post-levée. En effet, dans ce dernier cas, le désherbage chimique est effectué pour faciliter le travail du sol ultérieur en détruisant le couvert herbacé complètement. L'application d'un herbicide de pré-levée est inutile car les travaux du sol permettent de contrôler le couvert herbacé.

On notera que pour réaliser le contrôle de cohérence, on utilise des itinéraires techniques fixés à l'avance (selon les dates moyennes d'interventions observées) alors que dans la réalité certaines interventions (désherbage chimique, travail du sol de printemps) dépendent de la présence d'herbe. Un des contrôles portera donc sur la présence d'une couverture herbacée,

théoriquement présente, lors de la réalisation de ces interventions. Un second contrôle consiste à confronter la dynamique de la couverture herbacée à des connaissances expertes du terrain.

On a modélisé la dynamique de la couverture herbacée pour chacun de ces itinéraires techniques pour deux valeurs de potentiel hydrique, une valeur correspondant à un sol humide : $-0.088 MPa$ et une valeur correspondant à un sol un peu plus sec : $-0.131 MPa$.

Les paramètres climatiques : température et radiation globale sont issues de mesures sur le bassin versant de Roujan pour la période 01/09/2004 - 31/08/2005. Les températures utilisées sont des températures de l'air car nous ne disposons pas de températures du sol.

Les périodes de dormance des espèces étant en parties déterminées par la pluie, nous avons également utilisé les données pluviométriques journalières du bassin versant de Roujan pour la même période.

Pour chaque espèce il a été défini une densité de 80 graines/m².

6.3 Résultats

6.3.1 Paramétrisation des modèles de germination et de croissance

Les recherches bibliographiques bien que nombreuses n'ont pas permis de paramétrer les modèles pour l'ensemble des espèces principales observées pour l'agrosystème étudié. On résume dans le tableau 6.2, les cinq espèces pour lesquelles on a pu définir ou extrapoler des paramètres.

TABLE 6.2 – Paramètres pour la modélisation de l'émergence et la croissance de cinq espèces

	Germination				Croissance		
	T_{min}	$\sigma(\psi_{min})$	θ_{HT}	ψ_{min}	T_b	RGR	LAR
<i>Diploaxis erucoides</i>	10	0.345	28.68	-0.65	10	0.016 ^a	0.020 ^a
<i>Conyza canadensis</i>	7	0.345	5.01	-0.21	7	0.021	0.020
<i>Crepis sancta</i>	0	0.345	24	-0.86	0	0.027 ^b	0.029 ^b
<i>Poa annua</i>	7	0.345	91.56	-0.364	1.5	0.017	0.013
<i>Setaria viridis</i>	12	0.345	10.05	-0.47	12	0.015 ^c	0.012 ^c

^avaleurs extrapolées de *Capsella bursa-pastoris* ; ^bvaleurs extrapolées de *Senecio vulgaris* ; ^cvaleurs extrapolées de *Avena fatua*

Pour chaque espèce on indique dans le tableau 6.3 par saison, les types d'entretien du sol et les types de sol pour lesquels elle sera modélisée. Ces résultats s'appuient sur les observations des communautés d'espèces présentées au chapitre précédent.

6.3.2 Dynamiques de couverture herbacée pour différentes modalités d'entretien du sol

La figure 6.4 présente les dynamiques de la couverture herbacée pour trois itinéraires techniques couramment rencontrés sur la zone étudiée.

La composition en espèces adventices varie selon la saison et l'entretien du sol tel qu'indiqué dans le tableau 6.3 pour un sol non spécifique (O). Il est à noter que *Crepis sancta* n'est pas présent parmi les espèces simulées. Pour les sols travaillés, l'espèce simulée est *Diplotaxis erucoides* à l'automne comme au printemps. Pour les sols désherbés chimiquement ce sont *Poa annua* à l'automne, *Conyza canadensis* et *Setaria viridis* au printemps dont la croissance est simulée. Pour les sols entretenus par combinaison désherbage chimique et travail du sol, les espèces simulées sont *Diplotaxis erucoides* à l'automne et au printemps et *Conyza canadensis* au printemps.

La figure 6.4 illustre un cas où le sol est bien alimenté en eau. Au cours de la simulation, la levée de dormance automnale a lieu le 8 septembre et l'induction de dormance estivale le 18 juin.

TABLE 6.3 – Espèces modélisées (indiquées par +) en fonction de la saison, du type d'entretien du sol et du type de sol

	Autumn									Spring								
	Tillage			Mixed			Chemical			Tillage			Mixed			Chemical		
	A	H	O	A	H	O	A	H	O	A	H	O	A	H	O	A	H	O
<i>Diplotaxis erucoides</i>	-	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	+	-	+	+	-	+	-
<i>Conyza canadensis</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
<i>Crepis sancta</i>	+	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Poa annua</i>	+	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Setaria viridis</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	+	+

Tillage = entretien par travail du sol; Chemical = entretien par désherbage chimique; Mixed = entretien par combinaison désherbage chimique et travail du sol; A = sols à pH acide; H = sols hydromorphes; O = autres types de sols

Les trois itinéraires présentent une installation rapide de la couverture herbacée après la levée de dormance automnale. On note que l'installation de *Poa annua* sur le sol désherbé chimiquement (graphe au centre) est plus lente que celle de *Diplotaxis erucoides*. Cela est cohérent avec les paramètres : *Poa annua* à un potentiel hydrique minimal plus élevé et une température de base pour la germination plus faible.

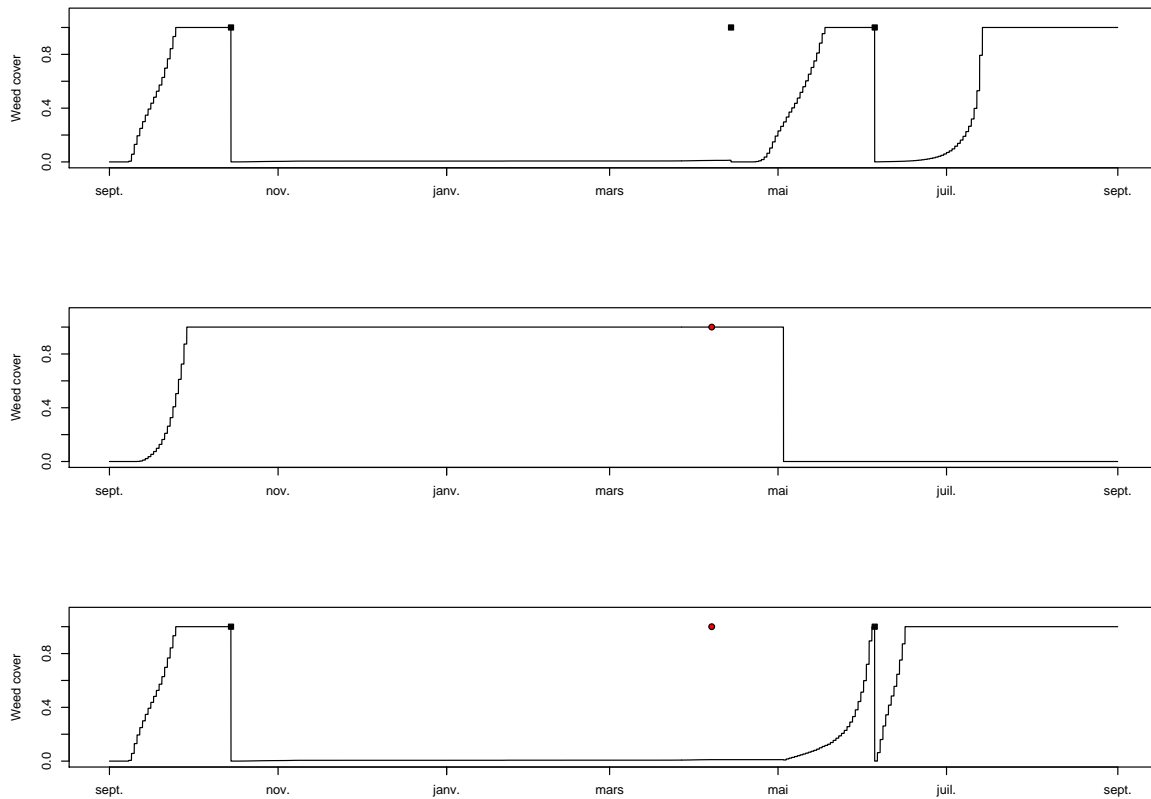


FIGURE 6.4 – Evolution de la couverture herbacée du sol pour trois itinéraires techniques : travail du sol ; désherbage chimique et combinaison désherbage chimique et travail du sol avec un potentiel hydrique fixe de -0.088 MPa.

Les carrés noirs indiquent des travaux du sol et les ronds rouges des dés herbages chimiques (post-levée seul dans le cas de la combinaison désherbage chimique et travail du sol ; pré et post-levée dans le cas désherbage chimique)

La période hivernale diffère fortement entre l'itinéraire qui met en oeuvre le désherbage chimique (au centre) et les deux autres. En effet, celui-ci est le seul à ne pas subir de travail du sol à l'automne, son couvert qui a atteint les 100% à la fin septembre se maintient donc tout l'hiver. Dans le cas de destruction par travail du sol, on constate qu'il n'y a pas de nouveau développement de couverture herbacée ensuite. Cela est dû au fait que les températures atteignent rarement les 10°C de moyenne à partir du 8 novembre et jusqu'à la mi-mars. Par conséquent *Diplotaxis erucoïdes* ne peut germer ou croître. Cela n'est pas cohérent avec les observations de terrain, pour cette espèce une calibration de la température de base différente de la valeur moyenne trouvée dans la littérature serait donc nécessaire. Il est à noter que les données pour cette espèce sont particulièrement difficiles à trouver dans la littérature.

Au printemps, les opérations soit de travail du sol pour le premier itinéraire technique, soit les dés herbages chimiques pour les deux autres itinéraires techniques, provoquent le changement de saison pour le modèle. Les taux de germination des espèces automnales sont mis à zéro et les espèces printanières débutent leur germination. *Diplotaxis erucoïdes* reprend ainsi son développement avec la montée des températures dans le cas du sol entretenu par travail

(graphe du haut). La reprise du développement après un second labour début juin, confirme bien l'effet de la température sur l'absence de développement hivernal.

Compte tenu de l'absence de couverture dans le cas du sol entretenu par combinaison des modalités (figure 6.4, graphe du bas), l'effet du désherbage chimique n'est pas apparent. Cela confirme l'incohérence de l'absence simulée de couverture hivernale pour cet itinéraire technique car le désherbage chimique, d'autant plus s'il emploie uniquement un herbicide de post-levée, est forcément réalisé sur une couverture herbacée présente. Cependant l'effet du désherbage chimique est visible pour l'itinéraire technique en désherbage chimique seul (figure 6.4, graphe du centre). On voit que pendant la durée d'incubation de 25 jours, la couverture reste stable puis est mise à zéro. Dans le cas de l'application d'herbicide de pré-levée en plus de l'herbicide de post-levée (figure 6.4, graphe du centre), on peut constater que la rémanence du produit empêche un nouveau développement herbacé. A l'inverse dans le cas d'application d'un herbicide de post-levée seul (figure 6.4, graphe du bas), on constate que le développement herbacé recommence après 25 jours suivant le désherbage. Pour ces sols, la composition floristique comprend *Diploaxis erucoides* mais également *Conyza canadensis*. On peut voir que l'association des espèces provoque un développement plus rapide de la couverture herbacée après un travail du sol. Cela est dû au fait que l'on réalise une somme de la couverture de chaque espèce et qu'en simulant deux espèces, on double ainsi la densité de graines au m^2 . Plutôt que de paramétrer une densité par espèce, un paramétrage d'une densité par espèce et par type de modalité d'entretien du sol est souhaitable pour pouvoir prendre en compte les différences de nombre d'espèces modélisées.

On ne présente pas ici les simulations avec un potentiel hydrique de $-0.131MPa$ car à l'échelle du cycle cultural les dynamiques sont presque similaires. Le retard de développement lié à ces deux valeurs d'humidité sont limitées : par exemple, dans le cas de sol entretenu par travail mécanique, la couverture herbacée atteint les 100% le 29 septembre avec le potentiel hydrique de $-0.088MPa$ et le 30 septembre avec le potentiel hydrique de $-0.131MPa$.

6.4 Discussion et conclusion

L'utilisation du modèle de temps hydrothermal pour représenter la germination associé au modèle de conductance pour la croissance permet de représenter de manière satisfaisante le développement du couvert herbacé perturbé par différentes opérations culturales que sont le travail du sol et le désherbage chimique. On peut constater que les températures de base influent fortement sur les dynamiques des espèces. Il est donc nécessaire de bien paramétrer ces variables. A l'inverse, peu d'effet du potentiel hydrique du sol a été constaté sur les cinétiques de développement des couverts. A des valeurs plus basses que $-0.131MPa$, on va atteindre rapidement les seuils minimaux de potentiel hydrique de certaines espèces comme *Conyza canadensis* ($\psi_{min} = -0.21MPa$). Par conséquent il semble que l'effet de l'humidité du sol risque plutôt de jouer sur la réalisation ou non de la germination plutôt que sur son intensité. Le modèle de temps hydrothermal semble donc plus sensible à la température qu'à l'humidité du sol. Dans ce cadre, il faudrait évaluer la sensibilité des résultats à l'utilisation de la température de l'air plutôt que celle du sol. Concernant le modèle de croissance et compte tenu de la proximité des valeurs de *RGR* et de *LAR* entre les espèces modélisées, il est logique que là aussi la température de base soit le paramètre qui différencie le plus les dynamiques entre espèces. *Crepis sancta* est l'espèce la plus atypique pour la croissance en terme de paramètres, il sera donc intéressant d'évaluer si sa différence conduit à des cinétiques de croissance plus rapides.

Peu d'espèces ont pu être paramétrées pour la modélisation. Compte tenu de la complète dépendance de la dynamique aux caractéristiques d'une espèce quand celle-ci est la seule représentée sur un sol donné, il serait bon de compléter la bibliothèque de cinq espèces présentée ici. Ainsi on intégrerait mieux les relais que réalisent les espèces au cours d'une saison dans leur contribution à la dynamique du couvert.

La densité de graines apparaît comme un paramètre de calage important de la modélisation de la dynamique du couvert. On a vu que le choix de la définir par espèce n'était pas adapté car cela différencie fortement les dynamiques selon qu'on représente une association d'espèces ou une espèce seule. Il est donc nécessaire de définir les densités selon la composition floristique modélisée. De plus, nous n'avons pas étudié les différences de densité de graines en fonction des différentes modalités d'entretiens du sol. Toutefois, les observations de terrain ont montré que les sols désherbés chimiquement chaque année avec des pré-levées présentaient des densités généralement plus faibles du fait du renouvellement moindre du stock de graines présent en surface (à cause des herbicides et de la non réalisation de travail du sol). La densité d'une même espèce devrait donc être calée en fonction de l'entretien du sol sur lequel on la fait se développer.

Les hypothèses de simplification mises en oeuvre pour représenter la dormance ne semblent pas a priori porter à conséquence sur la modélisation. Cependant le fait que la limite temporelle entre les deux saisons soit variable selon les opérations culturales peut entraîner des différences entre les dynamiques. En effet, on considère que les espèces printanières ne commencent à germer qu'après la première destruction du couvert postérieure au 1er février. Cependant en fonction des viticulteurs et de leurs pratiques, la destruction peut intervenir le 2 février ou le 15 avril. Dans le second cas, on ne commencera à faire germer les adventices qu'à partir du 15 avril, le stock de graines candidates à la germination sera ainsi épuisé moins tôt dans la saison que si la destruction avait eu lieu le 2 février. Il serait donc plus pertinent de se baser plus fortement sur les périodes de germination des espèces pour déterminer les fenêtres temporelles de germination dans le modèle.

On constate que le couvert demeure constant en période estivale. En effet, on ne représente pas la sénescence des plantes à l'issue de leur cycle de développement. Il faudrait donc évaluer quelle part a la sénescence estivale sur la couverture herbacée pour éventuellement la représenter empiriquement dans le modèle.

Finalement, si on a procédé ici à un contrôle par expertise de la cohérence des simulations, il sera nécessaire dans l'avenir de procéder également à une validation expérimentale du modèle par confrontation à des situations observées.

En conclusion, la modélisation de la dynamique du couvert herbacé, même si elle reste à améliorer, permet de représenter les différences de dynamique de la couverture herbacée du sol dans différentes situations d'entretien du sol. On va donc la mettre en oeuvre pour modéliser l'évolution de l'infiltrabilité du sol dans le chapitre suivant.

Remerciements

Un grand merci à Ouafa Yebba pour son travail de paramétrisation du modèle de temps hydrothermal. Merci à Simon Lalauze pour le codage informatique des modèles. Merci à Florent Mouillot, Serge Rambal, Jacques Lepart et Nathalie Colbach pour leur aide dans la recherche de modèles. Merci à Antoine Gardarin pour la discussion sur ce travail. Merci à Elena Kazakou, Patrick Andrieux, Jean-Christophe Fabre et Xavier Louchart pour leur appui.

Bibliographie

- Aikman, D. and Watkinson, A. (1980). A model for growth and self-thinning in even-aged monocultures of plants. *Annals of Botany*, 45(4) :419 –427.
- Aikman, D. P. and Benjamin, L. R. (1994). A model for plant and crop growth, allowing for competition for light by the use of potential and restricted projected crown zone areas. *Annals of Botany*, 73(2) :185 –194.
- Aikman, D. P. and Scaife, A. (1993). Modelling plant growth under varying environment conditions in a uniform canopy. *Annals of Botany*, 72(5) :485 –492.
- Allen, P. (2003). When and how many? hydrothermal models and the prediction of seed germination. *New Phytologist*, 158(1) :1–3.
- Andrieux, P., Hatier, A., Asseline, J., de Noni, G., and Voltz, M. (2001). Predicting infiltration rates by classifying soil surface features in a mediterranean wine-growing area. In *International symposium on the significance of soil surface characteristics in soil erosion, COST 623 « Soil erosion and global change » workshop*, Strasbourg, France.
- Bauer, M. C., Meyer, S. E., and Allen, P. S. (1998). A simulation model to predict seed dormancy loss in the field for bromus tectorum l. *Journal of Experimental Botany*, 49(324) :1235 –1244.
- Benech-Arnold, R. and Batlla, D. (2000). Effects of soil water status and depth of burial on dormancy changes in polygonum aviculare l. seeds. In *Proceedings III International Weed Science Congress*, page 10, Foz do Iguassu, Brasil.
- Benjamin, L. and Park, S. (2007). The conductance model of plant growth and competition in monoculture and species mixtures : a review. *Weed Research*, 47(4) :284–298.
- Bouwmeester, H. and Karsen, C. (1993). Seasonal periodicity in germination of seeds of chenopodium-album l. *Annals of Botany*, 72(5) :463–473.
- Bradford, K. (1995). Water relations in seed germination. In *Seed development and germination*, pages 351–396. J. Kigel et G. Galili (Eds.), New York, marcel dekker edition.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J., Meynard, J., and Delecolle, R. (1998). STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. i. theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18(5-6) :311–346.

- Colbach, N., Durr, C., Roger-Estrade, J., Chauvel, B., and Caneill, J. (2006). ALOMYSYS : modelling black-grass (*Alopecurus myosuroides* huds.) germination and emergence, in interaction with seed characteristics, tillage and soil climate - i. construction. *European Journal of Agronomy*, 24(2) :95–112.
- Gardarin, A., Guillemin, J., Munier-Jolain, N., and Colbach, N. (2010). Estimation of key parameters for weed population dynamics models : Base temperature and base water potential for germination. *European Journal of Agronomy*, 32(2) :162–168.
- Grundy, A. C. (2003). Predicting weed emergence : a review of approaches and future challenges. *Weed Research*, 43(1) :1–11.
- Gummerson, R. J. (1986). The effect of constant temperatures and osmotic potentials on the germination of sugar beet. *Journal of Experimental Botany*, 37(6) :729–741.
- Hilhorst, H. and Toorop, P. (1997). Review on dormancy, germinability, and germination in crop and weed seeds. *Advances in Agronomy*, 61 :111–165.
- Holst, N., Rasmussen, I., and Bastiaans, L. (2007). Field weed population dynamics : a review of model approaches and applications. *Weed Research*, 47(1) :1–14.
- Köchy, M. and Tielbörger, K. (2007). Hydrothermal time model of germination : Parameters for 36 mediterranean annual species based on a simplified approach. *Basic and Applied Ecology*, 8(2) :171–182.
- Meyer, S., Debaene-Gill, S., and Allen, P. (2000). Using hydrothermal time concepts to model seed germination response to temperature, dormancy loss, and priming effects in *elymus elymoides*. *Seed Science Research*, 10(3) :213–223.
- Munier-Jolain, N., Savoie, V., Kubiak, P., Maillet-Mezeray, J., Jouy, L., and Quéré, L. (2005). DECID'Herb, un logiciel d'aide au choix d'une méthode de lutte contre les mauvaises herbes pour une agriculture respectueuse de l'environnement. In *Proc. 19ème Conf. du COLUMA - Journées Internationales sur la Lutte contre les Mauvaises Herbes*, page 8 p., Dijon, France.
- Scaife, A., Cox, E. F., and Morris, G. E. L. (1987). The relationship between shoot weight, plant density and time during the propagation of four vegetable species. *Annals of Botany*, 59(3) :325–334.
- Vleeshouwers, L. (1997). Modelling the effect of temperature, soil penetration resistance, burial depth and seed weight on pre-emergence growth of weeds. *Annals of Botany*, 79(5) :553–563.
- Wiles, L., King, R., Schweizer, E., Lybecker, D., and Swinton, S. (1996). GWM : general weed management model. *Agricultural Systems*, 50(4) :355–376.

Chapitre 7

Modélisation de l'évolution de l'infiltrabilité à partir de la représentation de la dynamique des états de surface du sol

Sommaire

7.1	Introduction	203
7.2	Matériel et méthodes	203
7.2.1	L'évolution de l'infiltrabilité dans le cadre de l'évolution des états de surface sur sols nus	204
7.2.2	L'évolution de l'infiltrabilité sous l'effet du développement de la couverture herbacée	205
7.2.2.1	Sur un état de surface évolué présentant une croûte structurale continue et consolidée	205
7.2.2.2	Sur un état de surface ne présentant pas de croûte structurale consolidée	206
7.2.3	Contrôle de cohérence de la modélisation de l'évolution de l'infiltrabilité	207
7.3	Résultats et discussion	209
7.3.1	Itinéraire technique 1 : travail du sol (figures 1a et 1b)	209
7.3.2	Itinéraire technique 2 : désherbage chimique (figures 2a et 2b)	209
7.3.3	Itinéraire 3 : combinaison désherbage chimique et travail du sol (figures 3a et 3b)	209
7.3.4	Analyse de l'influence de la charge caillouteuse	210
7.3.5	Synthèse	211
7.4	Conclusion	212

Chapitre 7

Modélisation de l'évolution de l'infiltrabilité à partir de la représentation de la dynamique des états de surface du sol

7.1 Introduction

L'infiltrabilité du sol évolue entre les actions culturales sous l'effet de différents processus biophysiques que nous avons cherché à modéliser. On a ainsi présenté dans les chapitres précédents un modèle d'évolution des états de surface des sols nus après travail du sol et un modèle de dynamique du couvert herbacé pour les sols entretenus par travail du sol, désherbage chimique ou une combinaison des deux. On présente dans cette partie comment les deux modélisations sont conjuguées pour permettre une modélisation dynamique des états de surface du sol.

En effet, notre approche pour représenter la dynamique de l'infiltrabilité de la surface du sol passe par la détermination des états de surface du sol et pratiquement par l'utilisation d'une typologie d'états de surface adaptée à notre zone d'étude (Andrieux et al., 2001). Dans cette typologie, chaque type d'état de surface a été défini en terme d'infiltrabilité de surface du sol par des mesures réalisées au simulateur de pluie. On peut donc représenter la dynamique d'infiltrabilité en modélisant l'évolution des états de surface. Cependant, cette approche pose différentes questions auxquelles cette partie tente de répondre :

- Les états de surface tels que définis dans la typologie ont une variation discrète, comment passer de cette évolution discrète à la dynamique continue de l'infiltrabilité du sol ?
- Les modélisations mises en oeuvre pour représenter les facteurs de variations des états de surface reposent sur la représentation de différents processus qui se déroulent en parallèle dans le temps, comment alors les combiner ?

7.2 Matériel et méthodes

La démarche générale mise en oeuvre a consisté à réaliser une représentation de l'évolution de l'infiltrabilité sur sols nus puis de la compléter avec l'effet de la couverture herbacée en cherchant à évaluer et à intégrer les effets potentiels croisés entre les deux processus. La modélisation ainsi construite permet de simuler différents itinéraires techniques d'entretien

du sol. Rappelons qu'on ne s'intéresse pas à la dynamique de l'infiltrabilité sur les zones entretenues par enherbement permanent, considérant que l'infiltrabilité y est stable.

7.2.1 L'évolution de l'infiltrabilité dans le cadre de l'évolution des états de surface sur sols nus

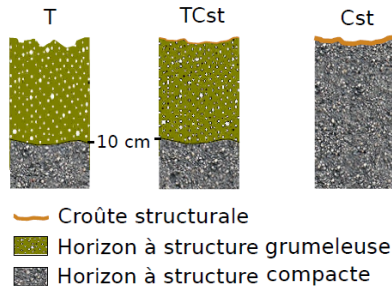


FIGURE 7.1 – Les trois types d'états de surface modélisés sur sols nus après travail du sol

croûte de surface et une compaction limitée (nommé *TCst*), un état croûté et compacté de la surface du sol (nommé *Cst*). Le modèle montre que les cumuls d'énergie cinétique nécessaires au passage de l'état créé par le travail du sol (*T*) à l'état suivant (*TCst*) sont faibles et que l'évolution est conditionnée uniquement par l'énergie cinétique. Par la suite, l'évolution de l'état *TCst* à l'état *Cst* est plus progressif sous l'effet de la pluie et de la présence plus ou moins importante de cailloux, ceux-ci accélérant l'évolution.

Compte tenu de ces dynamiques, on représente la dynamique de l'infiltrabilité comme représentée sur la figure 7.2.

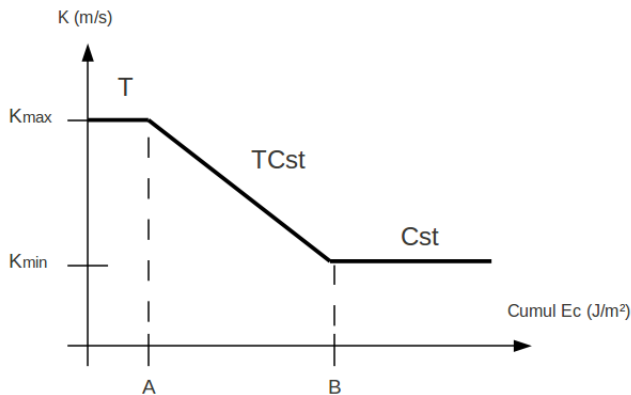


FIGURE 7.2 – Représentation de l'évolution de l'infiltrabilité sur sol nu après un travail du sol

entre deux cumuls d'énergie cinétique (A et B) qui sont respectivement, pour un sol avec une couverture en cailloux donnée, le cumul nécessaire pour que la probabilité d'observer

Le modèle présenté au chapitre 4 simule la dynamique des états de surface après un travail du sol pour des sols présentant des croûtes de type structurales comme c'est majoritairement le cas pour notre zone d'étude. En se basant sur le cumul d'énergie cinétique à partir de la date de travail du sol et le taux de couverture du sol par les cailloux, une régression logistique fournit des probabilités d'occurrence pour trois types d'états de surface (figure 7.1) : un état fraîchement travaillé très infiltrant (nommé *T*), un état qui présente un développement partiel de la

On considère que tant que le modèle indique une plus forte probabilité de l'état *T*, l'infiltrabilité n'évolue pas. En effet, le passage de *T* à *TCst* nécessite peu d'énergie cinétique de la pluie, la transition est rapide. L'infiltrabilité est alors maximale et correspond à la valeur associée dans la typologie à l'état de surface *T* soit $K = K_T = K_{max}$.

Une fois que le modèle indique une plus forte probabilité de l'état de surface *TCst*, la dynamique d'évolution pouvant être plus lente, on définit une évolution progressive de l'infiltrabilité. L'évolution est considérée comme linéaire

$TCst$ soit plus grande que celle d'observer T (A) et le cumul nécessaire pour que la probabilité d'observer Cst soit plus grande que celle d'observer $TCst$ (B) (figure 7.3). Dans ce cas $K = K_{max} - \left(\frac{(K_{max}-K_{min})(Cum_{EC}-A)}{(B-A)}\right)$.

Dès que le modèle indique une probabilité plus forte pour Cst , on considère que l'évolution de l'infiltrabilité est limitée, les valeurs d'infiltrabilité associées à cet état de surface dans la typologie étant de 10.8 mm/h. On fait alors l'hypothèse que l'infiltrabilité a atteint sa valeur minimale et n'évolue plus : $K = K_{Cst} = K_{min}$.

Pour les sols non travaillés, on suppose que l'état de surface est stable et a atteint son stade de dégradation maximum correspondant à la présence d'une croûte continue consolidée et à une infiltrabilité équivalente à K_{min} .

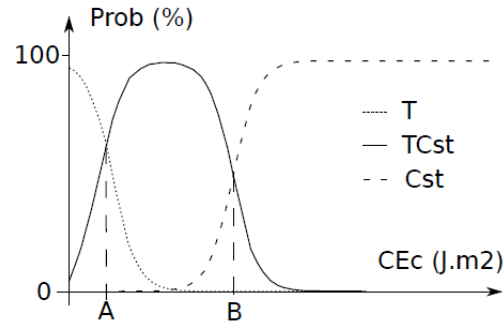


FIGURE 7.3 – Forme des courbes de probabilités des trois différents types d'état de surface selon le cumul d'énergie cinétique

7.2.2 L'évolution de l'infiltrabilité sous l'effet du développement de la couverture herbacée

7.2.2.1 Sur un état de surface évolué présentant une croûte structurale continue et consolidée

Dans la typologie des états de surface est défini un type qui correspond à la couverture d'un sol croûté par des plantes herbacées à hauteur de 50% ou plus (nommé $VCst$). Cet état est associé à une infiltrabilité de 26.4 mm/h. Par rapport à un état de surface du sol croûté de type Cst , la présence de végétation permet un gain d'infiltrabilité important.

Nous représentons ce gain sur la base des hypothèses suivantes, dont les deux premières sont directement issues des observations *in situ* d'Andrieux et al. (2001) :

- Quand la couverture herbacée est inférieure à 25%, l'augmentation est considérée nulle et l'infiltrabilité reste égale à celle de Cst , à savoir K_{min} .
- Quand la couverture herbacée dépasse les 50% de la surface, l'augmentation d'infiltrabilité est maximale et stable, elle est égale à K_{VCst} .
- Entre 25 et 50%, on suppose que l'augmentation de l'infiltrabilité est strictement proportionnelle à l'augmentation de taux de couverture à partir de la valeur de 25%. Cette phase non prévue par la typologie d'Andrieux et al. (2001) permet de représenter l'évolution progressive de l'infiltrabilité entre les stades Cst et $VCst$.

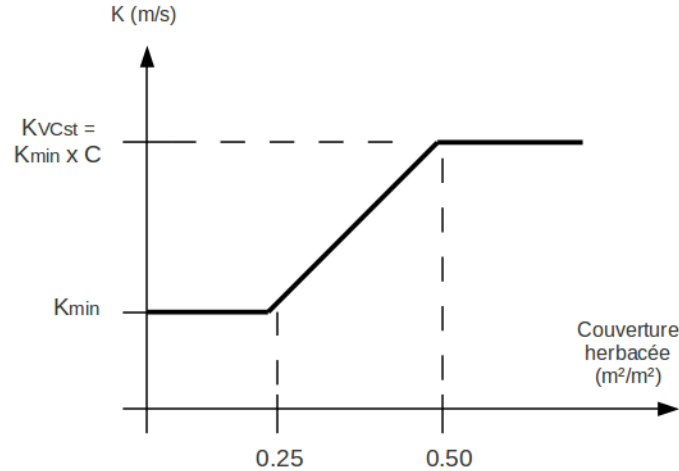


FIGURE 7.4 – Représentation de l'évolution de l'infiltrabilité sous l'effet de la croissance d'un couvert herbacé sur un sol compacté présentant une croûte structurale continue (Cst)

Le modèle peut ainsi être exprimé de la manière suivante (figure 7.4) :

soit Tc le taux de couverture herbacée du sol,

Si $Tc < 25\%$, $K = K_{min}$;

Si $25\% \leq Tc \leq 50\%$, $K = K_{min} + (K_{VCst} - K_{min}) \frac{(Tc-25)}{(50-25)}$;

Si $Tc > 50\%$, $K = K_{VCst}$.

7.2.2.2 Sur un état de surface ne présentant pas de croûte structurale consolidée

Dans les cas où l'entretien du sol est réalisé partiellement ou totalement par travail du sol, il peut y avoir en théorie concomitance entre les processus de consolidation et de croûtage de la surface du sol et les processus de développement de la couverture herbacée.

Ce cas est toutefois peu probable car, le plus souvent, dans le temps nécessaire à la croissance des adventices après un travail du sol, les pluies qui surviennent font évoluer l'état de surface jusqu'au niveau le plus évolué en termes de croûte et de compaction (Cst). Cependant, de manière exceptionnelle, des couvertures entre 25 et 50% par la végétation ont pu être observées sur des sols à croûte non consolidée ($TCst$) lors de campagnes de relevés des états de surface sur le bassin versant de Roujan. Par exemple, ce cas n'a été rencontré que 5 fois en 2007 sur 625 observations concernant 42 parcelles. Par souci d'exhaustivité, il nous a néanmoins semblé important d'en proposer une modélisation.

Nous avons donc généralisé les choix de représentation de l'évolution de l'infiltrabilité due au développement de couverture herbacée pour les sols à croûte consolidée (voir section précédente) au cas des sols à croûte non consolidée. Les hypothèses suivantes sont émises :

- Le développement d'un couvert herbacé sur un sol à croûte non consolidée produit une augmentation potentielle d'infiltrabilité dont l'amplitude relative est similaire à celle produite par le développement d'un couvert herbacé sur un état de surface croûté (Cst).
- L'augmentation d'infiltrabilité consécutive au développement du couvert herbacé ne peut toutefois conduire à une infiltrabilité supérieure à celle, notée K_{max} , d'un sol fraîchement travaillé, toujours considéré comme le plus infiltrant dans la littérature.

En conséquence, le modèle généralisé d'évolution de l'infiltrabilité, incluant le cas des sols avec croûtes consolidées et non consolidées, s'exprime ainsi :

Soit C , le coefficient multiplicateur de l'infiltrabilité lorsque le degré de couverture herbacée du sol passe de 25% à 50%. C est estimé par le ratio K_{VCst}/K_{Cst} .

Soit K_{init} , l'infiltrabilité du sol nu avec croûte avant développement de la couverture herbacée.

Si $Tc < 25\%$, $K = K_{init}$;

Si $25\% \leq Tc \leq 50\%$, $K = \min \left\{ K_{init} + (C K_{init} - K_{init}) \frac{(Tc-25)}{(50-25)} , K_{max} \right\}$;

Si $Tc > 50\%$, $K = \min \{ C K_{init} , K_{max} \}$.

En conclusion, on évalue d'abord l'infiltrabilité sur sol nu K_{init} puis on met éventuellement à jour cette infiltrabilité en prenant en compte la couverture herbacée.

7.2.3 Contrôle de cohérence de la modélisation de l'évolution de l'infiltrabilité

Pour évaluer la modélisation de la dynamique de l'infiltrabilité, nous procédons comme précédemment à un contrôle de la cohérence des résultats de simulation. A cet effet, nous avons simulé les mêmes itinéraires techniques que pour le contrôle de la modélisation de la couverture herbacée (tableau 6.1) avec les mêmes paramètres climatiques et pour une humidité fixée à $-0.088 MPa$.

Pour la simulation $K_{max} = 30mm/h$, $K_{min} = 10mm/h$, et $C = 2.5$.

Pour chaque itinéraire technique, on a doublé les simulations pour considérer deux valeurs de couverture du sol par les cailloux : une couverture de 0-25% et une couverture de plus de 50%.

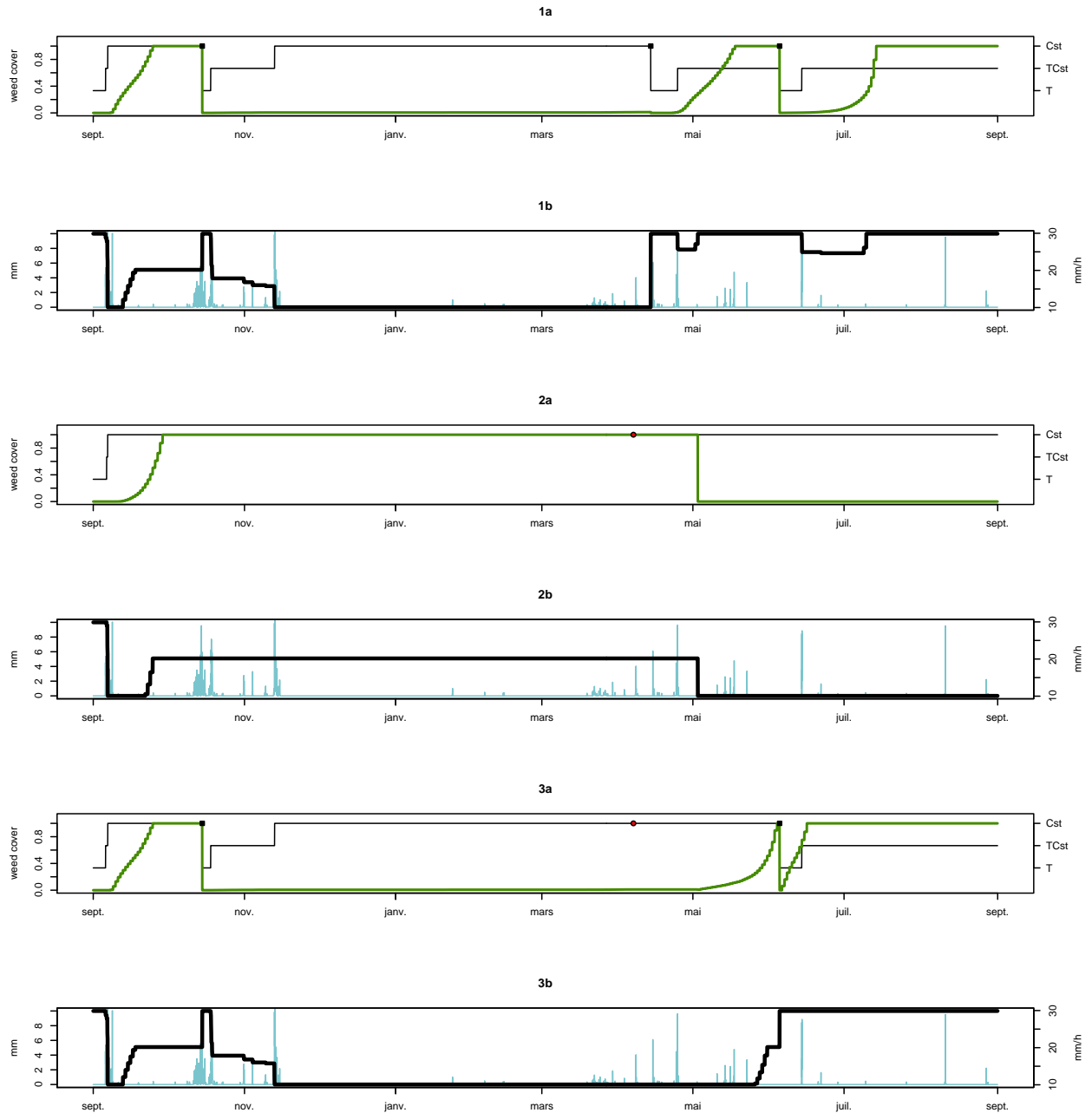


FIGURE 7.5 – Evolution de la couverture herbacée (courbe verte), des états de surface sur sols nus (courbe noire) et de l'infiltrabilité (courbe noire grasse) modélisée pour trois itinéraires techniques (de haut en bas) : travail du sol (1a;1b) ; désherbage chimique (2a;2b) ; combinaison désherbage chimique et travail du sol (3a;3b).

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

7.3 Résultats et discussion

La figure 7.5 montre les dynamiques d'infiltrabilité modélisées pour les trois itinéraires techniques choisis. On constate que l'infiltrabilité évolue bien suivant les évolutions d'états de surface du sol nu (plus l'état de surface a une valeur élevée, plus il est évolué) et de la couverture herbacée. Nous analysons ci-dessous les évolutions simulées et leur cohérence pour chaque itinéraire technique.

7.3.1 Itinéraire technique 1 : travail du sol (figures 1a et 1b)

Dans une première phase, partant d'un état de surface travaillé (T), on observe un rapide encroûtement du sol et donc une baisse de l'infiltrabilité, liés aux premières pluies d'automne. Ceci est ensuite compensé par la croissance des adventices qui rétablit une infiltrabilité moyenne.

Dans une deuxième phase, suite au travail du sol en octobre, seule une diminution de l'infiltrabilité par consolidation du sol sous l'effet des pluies est simulée, du fait de l'absence de développement des adventices causée par des températures trop basses.

Dans une troisième phase, démarrant en avril après un travail du sol de printemps, l'infiltrabilité du sol revient à son niveau le plus élevé et s'y maintient majoritairement sous l'effet croisé du développement de la couverture herbacée permise par l'augmentation des températures et d'un travail du sol complémentaire au mois de juin. Par rapport à une situation réelle, l'évolution simulée apparaît cohérente, mis à part le maintien d'une couverture herbacée tout au long de l'été. En effet, sur cette période, la sécheresse a pour effet de faner les couverts herbacés, phénomène non représenté dans la modélisation. Ce biais n'a toutefois que peu de conséquence sur la précision de simulation de l'infiltrabilité du sol dans la mesure où la senescence du couvert herbacé n'élimine pas à court terme les effets positifs du couvert en termes de protection du sol contre la battance et d'amélioration de la structure du sol par l'enracinement.

7.3.2 Itinéraire technique 2 : désherbage chimique (figures 2a et 2b)

Dans cet itinéraire technique, l'évolution de l'infiltrabilité est assez simple comparativement aux deux autres itinéraires. Durant les périodes automnales et hivernales, l'absence de travail du sol favorise, sous l'effet des pluies, un encroûtement intense du sol mais permet également une croissance du couvert herbacé. Ces deux évolutions qui ont des effets contraires sur l'infiltrabilité du sol produisent une valeur d'infiltrabilité stable de valeur moyenne. Au printemps, le désherbage chimique fait disparaître le couvert herbacé, ce qui réduit l'infiltrabilité à celle d'un sol nu encroûté.

7.3.3 Itinéraire 3 : combinaison désherbage chimique et travail du sol (figures 3a et 3b)

Cet itinéraire est proche de l'itinéraire « travail du sol ». Du point de vue des opérations culturales, il n'en diffère que par un désherbage chimique au début du mois d'avril qui remplace le travail du sol de mi-avril. Ainsi, l'évolution de l'état de surface et de l'infiltrabilité du sol durant l'automne et l'hiver est la même que celle de l'itinéraire « travail du sol ». Au printemps toutefois le désherbage par herbicide post-levée retarde la croissance simulée du couvert herbacé et ne permet pas un gain d'infiltrabilité en comparaison d'un travail du sol. Ainsi l'usage du désherbage chimique à la place du travail du sol en avril retarde de plus

d'un mois l'augmentation de l'infiltrabilité, à une période très sensible du point de vue du ruissellement car elle correspond à un pic de pluie du climat méditerranéen.

7.3.4 Analyse de l'influence de la charge caillouteuse

Pour illustrer cette influence, la figure 7.6 présente l'évolution de la couverture herbacée et des états de surface sous végétation pour le sol peu caillouteux (courbe noire) et caillouteux (courbe rouge).

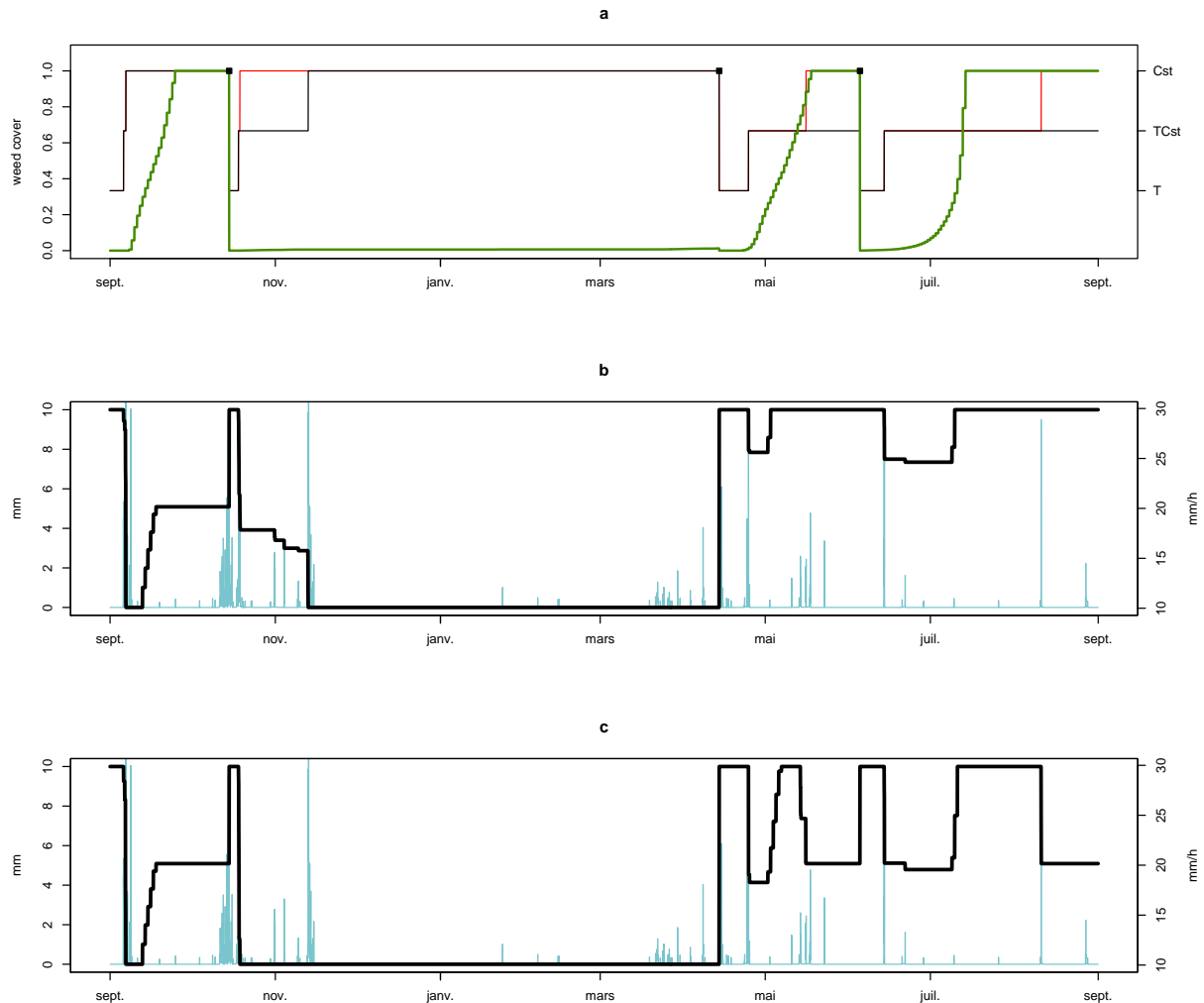


FIGURE 7.6 – Comparaison des évolutions des états de surface, du taux de couverture herbacée et de l'infiltrabilité entre un sol peu caillouteux et un sol très caillouteux entretenus par travail du sol.

(a) taux de couverture herbacée (courbe verte); états de surface du sol peu caillouteux (courbe noire); états de surface du sol très caillouteux (courbe rouge); (b) infiltrabilité du sol peu caillouteux; (c) infiltrabilité du sol très caillouteux. Les hauteurs pluviométriques sont indiquées par des barres verticales bleues.

On constate que l'on modélise effectivement des dynamiques d'évolution des états de surface plus rapides en présence de cailloux et par conséquent l'infiltrabilité diminue plus vite sous l'effet des pluies après un travail du sol.

La différence est particulièrement visible à la fin avril (suite au travail du sol du 14 avril) mais également en période estivale. En effet, à cette période, on peut observer sur les sols peu caillouteux, une infiltrabilité maximale qui est permise simultanément par la couverture herbacée et la non complète évolution de la croûte du sol (*TCst*).

Cette situation est moins fréquente dans le cas des sols caillouteux car l'état de surface *Cst* est plus facilement atteint. On voit effectivement (figure 7.6, graphe a) que la courbe simulée des états de surface pour les sol caillouteux atteint plus souvent le niveau le plus évolué correspondant à l'état de surface *Cst*.

7.3.5 Synthèse

Au total, on note plusieurs caractéristiques du modèle.

Il reproduit bien l'effet des opérations de travail du sol sur l'augmentation de l'infiltrabilité et des pluies, si elles sont importantes, sur la diminution rapide de l'infiltrabilité.

Il simule l'effet positif de la croissance de la couverture herbacée sur l'infiltrabilité (e.g. au mois de mai, alors que la courbe des états de surface sous végétation est plane, la couverture herbacée augmente sur les sols entretenus par travail du sol ou combinaison des modalités (figure 7.5, graphes 1a et 3a) et par conséquent l'infiltrabilité est améliorée (figure 7.5, graphes 1b et 3b).

Par contre, comme souligné au chapitre précédent, il ne simule pas de développement de la couverture herbacée en hiver pour les itinéraires incluant un travail du sol en octobre. Cela est à relier au fait que le modèle de germination-croissance des adventices est fortement lié à la température de base des espèces et que l'espèce modélisée (*Diploaxis erocoides*) a une température de base paramétrée à 10°C qui conduit à ne pas simuler de croissance hivernale. Or certaines espèces, et notamment *Diploaxis erocoides*, présentent fréquemment des développements hivernaux. Une révision de la paramétrisation serait donc nécessaire pour se rapprocher des observations de terrain. On peut donc retenir que dans l'état actuel, le modèle sous-estime probablement l'infiltrabilité hivernale sur les parcelles subissant un travail du sol à l'automne. On notera que cette sous-estimation a en fait peu d'influence sur l'évaluation de la contamination des eaux par les pesticides en systèmes viticoles car la période hivernale est à faible risque de contamination du fait d'un stock en pesticides dans le sol très faible

Enfin, le modèle simule d'autres situations également peu observées sur le terrain. Il en est ainsi des associations d'états de surface du sol peu évolués avec des couvertures herbacées supérieures à 50%. Ces situations surviennent dans les simulations en fin de printemps - début d'été à une période où les pluies sont peu importantes et ne permettent pas d'atteindre un état de surface très évolué avant que la couverture herbacée ne se développe. Ceci a pour conséquence de définir des retours à une infiltrabilité maximale dès que la couverture herbacée dépasse les 50% : ainsi pendant l'été, l'infiltrabilité est considérée équivalente à celle d'un travail du sol fraîchement réalisé. Le choix de représenter l'effet du couvert herbacé via un coefficient multiplicateur de l'infiltrabilité doit donc probablement être adapté pour limiter les situations incohérentes observées.

7.4 Conclusion

Ces résultats montrent que l'évolution de l'infiltrabilité modélisée est bien sensible à la fois à l'évolution des états de surface sur sols nus et à la dynamique de la couverture herbacée. On représente ainsi une dynamique de l'infiltrabilité qui paraît cohérente en regard des itinéraires techniques modélisés. Toutefois, pour les itinéraires incluant du travail du sol, il est probable au regard de l'expertise de terrain que le niveau d'infiltrabilité soit sur ou sous évalué à certaines périodes. Cela semble lié à un biais de paramétrisation du modèle de croissance des adventices. Une amélioration de ce modèle nécessitera certainement des calibrations propres à chaque espèce. Mais cela signifie de manière préliminaire l'acquisition de données d'observation in situ plus nombreuses pour les espèces impliquées, car les données disponibles actuellement dans la littérature sont limitées.

Enfin, on notera que, comme pour la modélisation de la couverture herbacée, il sera utile de pouvoir valider la modélisation développée avec un jeu d'observations des états de surface du sol, de la nature et du taux de la couverture herbacée et de l'infiltrabilité du sol à fréquence hebdomadaire sur un ensemble d'itinéraires techniques. Cette acquisition de données n'était malheureusement pas possible sur la durée de ce travail de thèse du fait de l'accent mis sur le développement d'une modélisation complète des actions techniques en matière d'entretien du sol et de leur couplage avec le fonctionnement hydrologique du bassin versant.

Remerciements

Merci à Simon Lalauze, Jean-Christophe Fabre et Xavier Louchart pour leur participation à l'ensemble de ce travail de modélisation. Merci à Patrick Andrieux et Marc Voltz pour leur aide à la mise en forme de ce travail.

Bibliographie

Andrieux, P., Hatier, A., Asseline, J., de Noni, G., and Voltz, M. (2001). Predicting infiltration rates by classifying soil surface features in a mediterranean wine-growing area. In *International symposium on the significance of soil surface characteristics in soil erosion, COST 623 « Soil erosion and global change » workshop*, Strasbourg, France.

Chapitre 8

Les indicateurs bio-physiques pour la décision

Sommaire

8.1	Introduction	217
8.2	Définition de seuils de teneur en eau pour la traficabilité et la travaillabilité des sols	218
8.2.1	Introduction	218
8.2.2	Matériel et méthodes	219
8.2.2.1	Les sols étudiés	219
8.2.2.2	Le réseau de parcelles et les viticulteurs experts	220
8.2.2.3	Les évènements pluvieux	221
8.2.2.4	Les mesures d'humidité et la détermination des seuils de travaillabilité	221
8.2.3	Résultats	222
8.2.3.1	Analyse de l'effet de l'expert	222
8.2.3.2	Effet des types de sol et des évènements pluvieux	222
8.2.4	Discussion	223
8.2.5	Définition d'autres seuils de travaillabilité et de traficabilité	224
8.3	Indicateurs et seuils pour le déclenchement du travail du sol et de la protection phytosanitaire	224
8.4	Conclusion	225

Chapitre 8

Les indicateurs bio-physiques pour la décision

8.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons décrit la représentation que l'on a effectué des processus biophysiques qui font évoluer l'infiltrabilité du sol suite aux opérations de travail du sol ou de désherbage chimique. On aborde maintenant la question des processus biophysiques qui influencent la répartition spatio-temporelle des actions des agriculteurs car ils portent sur des indicateurs pour l'action.

Dans le cadre de la modélisation des conduites techniques d'exploitation, on s'est attaché à représenter les éléments de la conduite qui conditionnaient la répartition spatio-temporelle de certaines actions culturales clefs dans le cadre d'une problématique de pollution de l'eau par les pesticides. On a alors pu lister un certain nombre d'indicateurs utilisés par les viticulteurs dans le cadre de leur gestion technique d'exploitation. Le premier d'entre eux est le climat qui est simulé dans le modèle DHIVINE via des données climatiques mesurées. On a également inclus dans ce qu'on définit comme « l'environnement » des systèmes de production, un bulletin d'information sur le développement des maladies de la vigne qui constitue un indicateur de l'état sanitaire des vignes. Mais il existe d'autres indicateurs dépendant de processus biophysiques qui jouent un rôle majeur dans le cadre des actions culturales que l'on cherche à représenter :

- la couverture herbacée du sol qui déclenche le travail du sol en période printanière ;
- le stade phénologique des cépages qui constitue un repère temporel du développement de la plante et qui est particulièrement utilisé pour la gestion de la protection phytosanitaire ;
- la travaillabilité et la traficabilité du sol qui définissent les jours où le sol est capable de supporter un travail ou le passage d'engins agricoles.

Dans la suite, nous présentons le traitement que nous avons effectué pour construire ces indicateurs. La première section aborde le cas des indicateurs de travaillabilité et traficabilité du sol, qui ont fait l'objet d'un travail approfondi, basé sur des mesures de terrain et des enquêtes auprès des agriculteurs. La deuxième section présente de manière succincte le cas des deux autres indicateurs, qui ont déjà fait l'objet (i) l'un d'une modélisation spécifique dans le cadre de la représentation de l'évolution de l'infiltrabilité du sol après réalisation d'un travail du sol ou d'un désherbage chimique ; (ii) l'autre d'une représentation simplifiée par exploitation d'une base de données d'observations.

8.2 Définition de seuils de teneur en eau pour la traficabilité et la travaillabilité des sols

8.2.1 Introduction

La définition de la traficabilité varie peu entre les auteurs. Elle est définie comme la capacité du sol à supporter et résister au passage d'engins agricoles sans engendrer de dégâts sur la structure du sol (Paul et De Vries, 1979 ; Rounsevell, 1993 ; Droogers et al., 1996 ; Earl, 1996).

La travaillabilité possède des définitions plus variables. Simalenga et Have (1992), Rounsevell (1993) et Earl (1996) la définissent comme la possibilité d'effectuer des opérations de travail du sol en minimisant les dégâts sur le sol. Droogers et al. (1996), la définissent comme la possibilité d'effectuer un travail du sol avec des effets positifs sur la structure du sol. Enfin, Terzaghi et al (1988), en donnent une définition assez large, en considérant uniquement la possibilité de travailler le sol. Pour notre cas d'étude en milieu viticole, la définition retenue est la possibilité du sol à être labouré sur une profondeur maximum de 20 cm, avec un outil de labour viticole à dent (outil le plus fréquemment utilisé sur la zone d'étude), sans engendrer de dégradation permanente de la structure du sol.

La teneur en eau du sol, en définissant la résistance mécanique de celui-ci, est le principal facteur déterminant de la traficabilité et de la travaillabilité (e.g. Paul et De Vries, 1979 ; Dexter et Bird, 2001 ; Hoogmoed et al, 2003 ; Arvidsson et Bölenius, 2006). Concernant la travaillabilité, des facteurs supplémentaires : intensité de précipitations, vitesse de dessèchement du sol, sont à prendre en compte car ils peuvent provoquer une prise en masse du sol (Young, 1992). En effet, ce phénomène, qui se caractérise par l'apparition d'une masse de sol dur et sans structure après dessèchement (en raison de l'effondrement des mottes à l'occasion d'un mouillage rapide, par précipitation ou irrigation) engendre des résistances du sol au travail (Gusli et al., 1994). La teneur en eau d'un sol va majoritairement déterminer sa disponibilité pour les opérations culturales. Pour déterminer la traficabilité d'un sol, on va donc chercher à savoir si le sol n'est pas trop humide. Pour déterminer la travaillabilité d'un sol on va chercher à savoir si sa teneur en eau n'est pas trop élevée ou trop faible pour permettre la réalisation d'un travail du sol sans engendrer de dégâts.

Différents modèles ont été développés pour définir les seuils d'humidité du sol à partir desquels le sol est travaillable et traficable. Deux grandes approches sont mises en oeuvre : (i) une approche de modélisation de la résistance mécanique du sol en fonction de la teneur en eau du sol et de ses propriétés mécaniques qui a conduit au développement de modèles de types mécanistes et empiriques et (ii) une approche par expertise qui consiste à mettre en relation directe traficabilité ou travaillabilité avec la teneur en eau du sol. Le premier type d'approche (e.g. Bekker, 1961 ; Knight et Rula, 1961) utilise en général un grand nombre de variables caractéristiques des sols qui nécessitent des mesures lourdes avec un outillage spécialisé (pénétrètres,...). Elle est donc plus difficile à mettre en oeuvre que le deuxième type d'approche. De surcroît, dans les deux cas, s'il est possible de définir à partir de ces approches des seuils d'état du sol à partir desquels le sol est travaillable et traficable, ils ne sont directement utilisables dans un modèle de décision de conduite de culture qu'après calibration et/ou validation par rapport aux seuils utilisés par les agriculteurs. Par conséquent, l'approche par expertise nous a semblé plus pertinente car plus simple de mise en oeuvre et donc plus aisément calibrable vis à vis des critères de décision des agriculteurs.

La variabilité des approches par expertise est essentiellement liée au mode de modélisation de l'évolution de la teneur en eau du sol. On trouve ainsi des modèles de type mécaniste

(SOIL, Jansson, 1991 & 1996), des modèles de réservoir comme celui mis en oeuvre dans le modèle OTELO (Attonaty et al., 1993), des modèles empiriques basés uniquement sur des données météorologiques et des propriétés de sols (Thomasson, 1982). Par ailleurs, pour la détermination des seuils d'intervention, deux méthodes de détermination ont été utilisées par les travaux existants :

- La première est une détermination, basée sur la littérature, des seuils en fonction du niveau de résistance mécanique du sol et donc de la teneur en eau que l'on estime correspondre aux seuils (par exemple Thomasson (1982) a défini ses seuils par rapport à la capacité au champ). Cette méthode nécessite d'avoir des références de travaux réalisés dans des contextes agropédoclimatiques proches de ceux étudiés ou de disposer de calendriers observés de jours travaillés pour calibrer les seuils.
- La seconde est une détermination experte, basée sur la connaissance des agriculteurs ou des acteurs de terrain. En effet, Cerf et al. (1998) ont montré que les agriculteurs possèdent un jugement homogène pour définir le premier jour possible pour une opération culturale particulière, il est donc possible de se baser sur leur expertise pour déterminer un seuil d'intervention. Cette méthode se base sur les dires des agriculteurs afin de définir par exemple un nombre de jours à attendre après un événement pluvieux pour la réalisation de travaux. Les dires d'expert sont accompagnés de mesures sur le terrain pour permettre de définir les seuils d'intervention. C'est par exemple la démarche qui a été mise en oeuvre par ARVALIS pour mettre en place le logiciel JDispo[®] (utilisé notamment pour des calculs de rentabilité économique de différents choix de pratiques).

Au final, nous nous sommes appuyés sur la seconde méthode, basée sur les dires des agriculteurs. En effet, les seuils déjà déterminés dans la littérature pour la travaillabilité du sol n'ont pas concerné les systèmes viticoles et plus généralement les cultures pérennes en rangées. Or, le matériel et les interventions réalisées en viticulture diffèrent significativement d'autres situations agricoles : les tracteurs sont adaptés à la culture en rangée, le travail du sol est peu profond,... De surcroît nous ne bénéficions pas de données suffisantes sur la zone d'étude en terme de calendriers de jours travaillés.

Dans la suite, nous présentons l'application de l'approche par expertise sur les dires d'agriculteurs pour estimer le seuil maximal de teneur en eau relatif à la travaillabilité du sol. Pour ce qui concerne les autres seuils, dont nous avons besoin, notamment ceux relatifs à la traficabilité, nous les avons estimés à partir des résultats sur la travaillabilité.

8.2.2 Matériel et méthodes

La démarche suivie a consisté à évaluer des seuils d'intervention, exprimés en humidité volumique du sol, en se basant sur les diagnostics fournis par les viticulteurs associés à des mesures d'humidités pondérales de surface effectuées à plusieurs moments après des événements pluvieux. Un réseau de 19 parcelles réparties sur 4 types de sol a été constitué pour cette évaluation.

8.2.2.1 Les sols étudiés

La zone d'étude est le bassin versant de la Payne. Les quatre types de sol étudiés sont :

- des sols développés sur alluvions récentes ou actuelles de la Payne ou de petits cours d'eau (*Sol 1*), ce sont donc des sols proches du lit majeur de la Payne, en bordures de

- cours d'eau, en fonds de talwegs ou en bas-fonds ; ils représentent 17,5% des sols cultivés en vigne du bassin versant ; ils ont une texture de type Limon argilo-sableux ;
- des sols développés sur alluvions anciennes de la Peyne (*Sol 2*) qui représentent 14,5% des sols cultivés en vigne du bassin versant ; ils ont une texture de type Sable argilo-limoneux à Argile sableuse ;
 - des sols développés directement sur molasse (*Sol 3*) qui représentent 18,1% des sols cultivés en vigne du bassin versant ; ils ont des textures variées correspondant à différentes associations des trois fractions : sable, limon et argile ;
 - des sols sur dépôts plio-villafranchiens (*Sol 4*) qui représentent 11,8% des sols cultivés en vigne du bassin versant ; ils ont des textures de type Limon argilo-sableux ou Argilo-Limono-Sableuse.

Les sols étudiés sont donc représentatifs de 61,9% des sols du bassin versant de la Peyne.

On présente dans le tableau 8.1 les caractéristiques des sols en terme de masse volumique de la terre fine, de taux d'argile et de taux de cailloux.

TABLE 8.1 – Densité de terre fine, taux d'argile et taux de cailloux des sols étudiés

	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4
Densité de terre fine (g/cm ²)	1.242	1.128	1.189	1.146
Taux d'argile (%)	21	24	17	31
Taux de cailloux (%)	14	19	9	20

8.2.2.2 Le réseau de parcelles et les viticulteurs experts

Les 19 parcelles étudiées ont été sélectionnées parmi les parcelles dont les pratiques d'entretien du sol étaient connues. Les vignes de moins de 3 ans ont systématiquement été écartées de l'échantillon car la plantation étant récente, le sol a subi de lourds travaux (défonçage, sous-solage) qui ont endommagé sa structure et sa texture de surface. De plus, la pratique d'entretien du sol pour les plantiers (jeunes vignes) est souvent spécifique et différente de celle des vignes adultes en production.

Les experts, au nombre de 8, étaient tous des viticulteurs exploitant des vignes sur le bassin versant. Ils ont eu à diagnostiquer la travaillabilité de parcelles dont le type de sol leur était familier, c'est à dire qu'ils avaient au moins une parcelle entretenue par travail du sol et avec le même type de sol dans leur exploitation. Ils ont effectué des expertises sur des parcelles de leur exploitation mais également sur d'autres parcelles pour nous permettre d'avoir le maximum d'expertises pour une parcelle donnée. Afin d'évaluer des variations entre experts, on les a classé en deux catégories : exigeants et tolérants par rapport à la qualité de travail du sol qu'ils souhaitent réaliser. Le classement a été réalisé par analyse des dires des viticulteurs.

Le tableau 8.2 présente la répartition du nombre de parcelles et d'experts par type de sol ainsi que les nombres d'observations effectuées classées selon le diagnostic : le sol est travaillable ou le sol n'est pas travaillable.

TABLE 8.2 – Répartition des parcelles, des experts et des observations en fonction des types de sols étudiés

	Nombre de parcelles suivies	Nombre d'experts	Nombre d'observations de sol travaillable	Nombre d'observations de sol non travaillable
Sol 1	5	3	12	9
Sol 2	3	2	5	4
Sol 3	5	2	10	11
Sol 4	4	2	6	6

8.2.2.3 Les évènements pluvieux

Les observations ont été réalisées entre le 28 avril 2009 et le 5 juin 2009 et ont porté sur trois évènements pluvieux. Après chaque évènement pluvieux, les viticulteurs étaient contactés pour effectuer un diagnostic de travaillabilité. Des mesures d'humidité pondérale étaient alors effectuées sur des prélèvements réalisés dans les parcelles. Plusieurs mesures ont ainsi été obtenues au cours du temps afin de disposer pour une parcelle donnée et après chaque évènement pluvieux d'au moins une mesure associée au diagnostic : « le sol n'est pas travaillable » et une mesure associée au diagnostic : « le sol est travaillable ». Ainsi les observations réalisées permettent d'encadrer le seuil de teneur en eau pour la travaillabilité.

Le tableau 8.3 indique les dates et la hauteur de pluie pour chacun des évènements ainsi que le nombre de parcelles par évènement pluvieux pour lesquelles des mesures ont été réalisées avant et après que le seuil de travaillabilité ait été atteint. Ce sont ces mesures qui ont servi à la détermination des seuils.

TABLE 8.3 – Caractéristiques et observations réalisées pour les trois évènements pluvieux étudiés

		Evènement pluvieux 1	Evènement pluvieux 2	Evènement pluvieux 3
Date		28 avril 2009	15 mai 2009	3 juin 2009
Cumul de pluie (mm)		25	12	20
Nombre de parcelles avec des mesures encadrant le seuil de travaillabilité	Sol 1	5	3	1
	Sol 2	1	3	0
	Sol 3	6	5	0
	Sol 4	2	1	4

8.2.2.4 Les mesures d'humidité et la détermination des seuils de travaillabilité

Les mesures d'humidités pondérales ont été réalisées sur des prélèvements de sol effectués dans les 10 premiers centimètres du sol. Les prélèvements étaient situés sur l'inter-rang. Pour une parcelle, un prélèvement était constitué d'un mélange de prélèvements sur trois à quatre zones situées à environ 2m d'intervalle. Quand elles étaient connues, les zones de prélèvement dans les parcelles ont été choisies dans les zones utilisées par les viticulteurs pour établir leur diagnostic. Généralement ces zones indicatrices étaient les moins drainantes et donc les plus problématiques pour le travail du sol. L'humidité pondérale des échantillons prélevés a été

déterminée par pesée dans l'état humide, puis par pesée après passage à l'étuve à 105°C durant 24h. L'humidité volumique était calculée en multipliant l'humidité pondérale à la densité apparente du sol (tableau 8.1).

Pour une parcelle donnée et pour un évènement pluvieux donné, la détermination du seuil de travaillabilité a été réalisée en prenant la valeur médiane entre la valeur minimale d'humidité correspondant au diagnostic : « le sol n'est pas travaillable » et la valeur maximale d'humidité correspondant au diagnostic : « le sol est travaillable ».

8.2.3 Résultats

8.2.3.1 Analyse de l'effet de l'expert

TABLE 8.4 – Seuils de travaillabilité en fonction des classes d'expert

Classe d'expert	Seuil moyen (%)	Nombre de seuils
Tolérants	19.3	12
Exigeants	17.1	19

Le tableau 8.4 présente les résultats des seuils d'intervention obtenus, tous types de sol et tous évènements pluvieux confondus en fonction des deux classes d'experts. On constate effectivement que le seuil de travaillabilité des viticulteurs exigeants est plus bas : ils mettent en oeuvre leurs travaux du sol sur des sols apparemment plus secs que les viticulteurs classés comme tolérants. Cependant une analyse de variance indique que cette différence n'est pas significative.

8.2.3.2 Effet des types de sol et des évènements pluvieux

Le tableau 8.5 présente les seuils moyens de travaillabilité en humidité volumique calculés en fonction des types de sol et pour les trois évènements pluvieux étudiés.

TABLE 8.5 – Seuils moyens de travaillabilité en humidité volumique (%) pour les différents types de sols et les trois évènements pluvieux suivis

	Evènement pluvieux 1	Evènement pluvieux 2	Evènement pluvieux 3
Sol 1	18.0	18.4	<i>13.3</i>
Sol 2	<i>20.5</i>	16.6	-
Sol 3	18.5	20.6	-
Sol 4	20.0	<i>17.8</i>	13.6

Les valeurs en italique indiquent qu'il n'y a eu qu'un seul seuil calculé pour ce groupe.

On peut voir que pour les deux premiers évènements pluvieux suivis, les seuils calculés diffèrent peu d'un type de sol à l'autre. Seul le seuil calculé pour le deuxième évènement dans le cas du sol 2 est plus faible du fait d'une parcelle pour laquelle le seuil de travaillabilité a été défini pour une valeur d'humidité volumique de 12.7%.

On constate par ailleurs que les mesures effectuées suite au troisième évènement pluvieux de début juin, conduisent à évaluer des seuils de travaillabilité pour des humidités plus faibles. Les viticulteurs ont attendu que le sol soit plus sec pour le déclarer travaillable.

On constate par ailleurs que les mesures effectuées suite au troisième évènement pluvieux de début juin, conduisent à évaluer des seuils de travaillabilité pour des humidités plus faibles. Les viticulteurs ont attendu que le sol soit plus sec pour le déclarer travaillable.

8.2.4 Discussion

Les résultats obtenus indiquent que les seuils calculés en humidité volumique varient peu d'un type de sol à l'autre. Par conséquent, les sols étudiés représentant plus de 60% des sols cultivés de la zone étudiée, on considère que les seuils sont valables quelque soit le type de sol. Ceci n'est pas forcément un résultat généralisable à la détermination de seuils d'intervention du fait que les types de sol de la zone présentent une gamme texturale modérée.

Une certaine variabilité entre experts a été observée puisque pour les viticulteurs ayant exprimé une certaine tolérance pour la mise en œuvre du travail du sol, le seuil d'humidité tolérée observé était plus élevé que pour les viticulteurs moins tolérants. Mais la faible différence conjuguée à un échantillon réduit font que la différence observée n'est pas statistiquement significative.

A côté de cette variabilité de seuils entre experts, les observations suggèrent aussi la possibilité d'une variabilité d'appréciation d'un expert suivant l'historique pluvieuse. En effet, on a pu constater que le seuil d'intervention pour le troisième événement était plus bas, comme si les viticulteurs étaient plus exigeants sur le niveau d'humidité du sol à cette période. Or, il s'avère, comme on peut le voir sur la figure 8.1, que le printemps 2009 et particulièrement le mois d'avril a été très pluvieux. En conséquence, comme ces pluies les ont empêchés de travailler le sol, les viticulteurs étaient en retard sur le travail du sol au moment des expertises réalisées suite aux deux premiers événements pluvieux. En connaissance de cette situation, il nous a semblé que les seuils définis à ces moments là pouvaient illustrer une plus grande tolérance des viticulteurs dans une situation d'urgence. Le dernier événement pluvieux est survenu à un moment où le travail du sol n'était plus aussi urgent à faire car il avait été fait récemment et donc il paraît logique que le seuil de travaillabilité ait été estimé plus durement.

En conclusion, les seuils de travaillabilité semblent dépendre principalement du niveau de tolérance des viticulteurs, tolérance dépendant soit de leur conception personnelle du travail du sol, soit de l'urgence ou non à réaliser un travail du sol. On peut donc définir deux valeurs de seuils :

- une valeur d'humidité volumique pour les situations d'urgence qui correspond à la moyenne des seuils calculés pour les deux premiers événements de pluie et qui vaut 18,7% (on n'a pas intégré les valeurs en italique) ;
- une valeur pour les situations « de routine » et qui correspond au seuil calculé sur le type de sol 4 suite au troisième événement pluvieux : 13,6%.

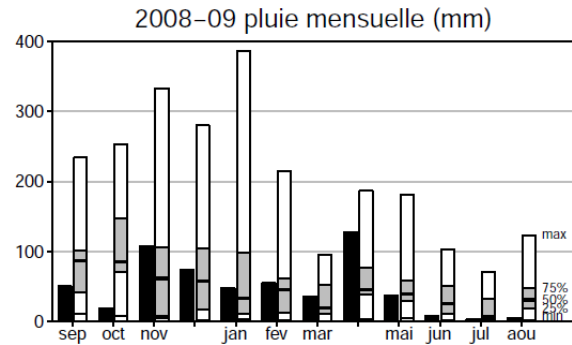


FIGURE 8.1 – Pluie mensuelle à Roujan entre le 1er septembre 2008 et le 1er septembre 2009

Les pluies de l'année sont en noires. Les bâtons blancs donnent les valeurs de référence calculées sur la chronique 1992-2010.

8.2.5 Définition d'autres seuils de travaillabilité et de traficabilité

On a évoqué dans l'introduction qu'il existait d'autres seuils d'intervention à déterminer :

- un seuil d'humidité minimal pour la travaillabilité pour éviter le travail sur sol trop sec ;
- un seuil d'humidité maximal pour la traficabilité.

Ces seuils n'ont pu être étudiés durant la thèse car la période de mesure de fin de printemps pour la travaillabilité ne correspondait pas aux périodes auxquelles les problèmes de prise en masse des sols et de portance surviennent (automne et début de printemps). On a par conséquent défini par jugement expert des valeurs à partir des seuils de travaillabilité estimés. Pour le seuil maximal d'humidité relatif à la traficabilité il a été fixé supérieur à celui de la travaillabilité, puisque les contraintes exercées sur le poids des engins sont inférieures à celles exercées par l'opération de travail du sol.

Le tableau 8.6 indique les valeurs retenues pour l'ensemble des seuils. Ceux-ci sont utilisés dans la modélisation de la manière suivante : sur la base de la teneur en eau du sol de surface calculée par le modèle hydrologique MHYDAS, le modèle DHIVINE s'appuie sur ces seuils pour définir si l'opération est réalisable ou non.

TABLE 8.6 – Seuils de travaillabilité et de traficabilité définis dans DHIVINE

	Seuil en humidité volumique (m^3/m^3)
Seuil de travaillabilité en situation d'urgence	0.19
Seuil de travaillabilité en situation « de routine »	0.14
Seuil de travaillabilité minimal (en sec)	0.05
Seuil de traficabilité en situation d'urgence	0.22
Seuil de traficabilité en situation « de routine »	0.20

8.3 Indicateurs et seuils pour le déclenchement du travail du sol et de la protection phytosanitaire

Le déclenchement du travail du sol et de la protection phytosanitaire dépendent respectivement de l'évolution de la couverture herbacée et des stades phénologiques. La question de la définition de seuils de déclenchement se pose pour ces variables de manière similaire à celle posée pour la variable teneur en eau du sol dans le cas traité ci-dessus. Pour y répondre, il est nécessaire soit d'avoir suffisamment d'observations des occurrences de déclenchement afin de pouvoir calibrer ces seuils soit de se fonder sur les dires des viticulteurs. Pour les deux variables « couverts herbacés » et « stades phénologiques », nous ne disposons pas de jeux d'observations suffisants pour permettre une calibration des seuils de déclenchement, nous avons donc envisagé également une détermination sur les dires de viticulteurs avec les résultats suivants.

Pour le déclenchement du travail du sol les échanges avec les viticulteurs n'ont pas permis de formaliser des seuils de déclenchement sur la seule base de l'étendue du couvert herbacé malgré une tentative d'échange sur la base de photos de parcelles présentant des développements herbacés variés. On a donc, à dires d'expert et sur les observations de terrain dont nous disposons, fixé un seuil de déclenchement quand la couverture atteint les 20%. Il est toutefois

clair que pour les viticulteurs d'autres paramètres du couvert influent sur la prise de décision de déclencher un travail du sol : quelles espèces sont présentes ? quelle hauteur présente le couvert ?...

Pour le déclenchement de la protection phytosanitaire, nous avons basé les seuils sur les stades phénologiques indiqués par les viticulteurs. Cependant, un questionnement similaire se pose. Bien que les stades phénologiques soient manipulés couramment par les viticulteurs, il leur est difficile d'exprimer clairement un stade déclencheur d'une action. En effet, le viticulteur ne caractérise pas le stade phénologique d'un échantillon de pieds de vigne pour établir le stade phénologique en cours sur la parcelle, il en fait une évaluation globale par expertise. Dans ce cadre, il peut lui sembler incongru de différencier un stade 3 feuilles étalées d'un stade 5 feuilles étalées pour identifier ce qui déclenche une action. Le stade indicateur donné par le viticulteur est donc considéré comme approximatif. Toutefois, pour cet indicateur, l'approximation sur les seuils porte moins à conséquence. En effet, en déclenchant les actions à des stades phénologiques approximatifs mais variés en fonction des viticulteurs, on suppose que l'on représente une variabilité réaliste : tous les viticulteurs qui ont le même seuil pour un indicateur, ne déclenche pas pour autant les traitements le même jour.

8.4 Conclusion

La représentation des processus biophysiques influençant la répartition spatio-temporelle des actions des agriculteurs pose deux types de questions : Dispose-t-on de modèles pour représenter les processus biophysiques ? Comment interprète-t-on les résultats de ces modèles pour représenter ce que prend en compte l'agriculteur dans ses décisions d'actions ?

Les deux questions posées sont en interaction puisque les modélisations des processus doivent simuler les indicateurs réellement utilisés par l'agriculteur. On a ainsi pu noter pour les processus traités dans ce chapitre, que les modélisations des processus que nous avons développées pouvaient être trop limitées à ce égard et devraient sans doute être réexaminées dans le futur. Par exemple, la simulation du strict taux de couverture du sol n'est pas un indicateur suffisant pour reproduire le critère de déclenchement du travail du sol par l'agriculteur ; d'autres caractéristiques du couvert herbacé sont également à prendre en compte.

Pour la détermination des seuils de déclenchement des actions, le cas étudié de manière approfondie relatif à la travaillabilité du sol montre que la méthode mise en oeuvre qui s'appuie sur l'expertise des viticulteurs fournit des résultats intéressants. Il s'agit toutefois, d'une méthode contraignante pour les viticulteurs qui sont fortement sollicités pour aller faire un diagnostic sur des parcelles à des périodes chargées en travail et pour l'opérateur qui doit procéder aux prélèvements de sol et ceci régulièrement après une pluie. La méthode est d'autant plus contraignante que ses résultats dépendent totalement des événements climatiques qui conditionnent les mesures. Il n'a donc pas été possible vu les délais impartis et les moyens disponibles d'appliquer cette méthode pour l'ensemble des indicateurs et seuils à déterminer.

Finalement, les questions sur la modélisation des processus biophysiques, quand l'objectif est de fournir des indicateurs pour l'action, se posent différemment comparés aux situations où les processus biophysiques sont modélisés pour eux-mêmes. Y répondre exige des travaux spécifiques qui seront à envisager au-delà du cadre strict de cette thèse. Les résultats acquis ont néanmoins permis d'évaluer sur un processus biophysique important, celui concernant la travaillabilité du sol, une approche potentielle et d'arriver à une première estimation d'indicateurs et seuils de déclenchement utilisables pour la modélisation de la conduite technique du vignoble.

Remerciements

Je remercie vivement Séverine Cauhapé pour le travail de terrain, de laboratoire et d'analyse qui a conduit aux résultats présentés dans ce chapitre sur la travaillabilité. Merci aux viticulteurs experts. Merci à Guillaume Coulouma, Olivier Huttel et Anne Biarnès pour leur appui à l'encadrement du stage de Séverine. Merci à Eric Von Bonn pour son travail bibliographique sur la modélisation de la travaillabilité et de la traficabilité. Merci à Gilles Eschenbrenner d'Arvalis pour ses conseils et la présentation de l'outil JDispo®. Merci à Cécile Gomez, Yves Blanca et Jean-Luc Belotti pour leur travail de terrain. Merci à Laurent Prévot pour la figure 8.1.

Bibliographie

- Arvidsson, J. and Bölenius, E. (2006). Effects of soil water content during primary tillage - laser measurements of soil surface changes. *Soil & Tillage Research*, 90(1-2) :222–229.
- 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.
- Bekker, M. (1961). Evaluation and selection of optimum vehicle types under random terrain conditions. In *Proceedings of the 1st ISTVS International Conference*, pages 772– 785, Torino-Saint Vincent, Italy.
- Cerf, M., Papy, F., and Angevin, F. (1998). Are farmers expert at identifying workable days for tillage ? *Agronomie*, 18(1) :45–59.
- Dexter, A. and Bird, N. (2001). Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. *Soil & Tillage Research*, 57(4) :203–212.
- Droogers, P., Fermont, A., and Bouma, J. (1996). Effects of ecological soil management on workability and trafficability of a loamy soil in the netherlands. *Geoderma*, 73(3-4) :131–145.
- Earl, R. (1996). Prediction of trafficability and workability using tensiometers. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 63(1) :27–33.
- Gusli, S., Cass, A., Macleod, D., and Blackwell, P. (1994). Structural collapse and strength of some australian soils in relation to hardsetting .1. structural collapse on wetting and draining. *European Journal of Soil Science*, 45(1) :15–21.
- Hoogmoed, W., Cadena-Zapata, M., and Perdok, U. (2003). Laboratory assessment of the workable range of soils in the tropical zone of veracruz, mexico. *Soil & Tillage Research*, 74(2) :169–178.
- Jansson, P. (1991). SOIL model, user’s manual. communications 91 :7. Technical report, Department of Soil Sciences, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden.
- Jansson, P. (1996). Simulation model for soil water and heat conditions. report 165 (revised edn). Technical report, Department of Soil Sciences, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden.
- Knight, S. and Rula, A. (1961). Measurement and estimation of the trafficability of fine-grained soils. In *Proceedings of the 1st International ISTVS Conference*, pages 371–384, Torino-Saint Vincent, Italy.

- Paul, C. and Vries, J. D. (1979). Effect of soil-water status and strength on trafficability. *Canadian Journal of Soil Science*, 59(3) :313-324.
- Rounsevell, M. (1993). A review of soil workability models and their limitations in temperate regions. *Soil Use and Management*, 9(1) :15-21.
- Simalenga, T. and Have, H. (1992). Estimation of soil tillage workdays in a semiarid area. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 51(2) :81-89.
- Terzaghi, A., Hoogmoed, W., and Miedema, R. (1988). The use of the wet workability limit to predict the land quality workability for some uruguayan soils. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 36(1) :91-103.
- Thomasson, A. (1982). Soil and climatic aspects of workability and trafficability. In *9th Conference of the International Soil Tillage Research Organisation (ISTRO)*, pages 551-557, Osijek, Yugoslavia.
- Young, I. (1992). Hardsetting soils in the UK. *Soil & Tillage Research*, 25(2-3) :187-193.

Troisième partie

Le modèle couplé DHIVINE -
MHYDAS

On présente dans cette partie les modalités du couplage des modèles thématiques unitaires pour construire le modèle couplé pression-impact. On présente donc les interactions entre les différents modèles et comment elles sont réalisées. Un second chapitre présente une application du modèle couplé à un cas réel pour illustrer le fonctionnement du modèle, présenter des types de résultats qu'il peut produire à ce jour et discuter de l'évaluation d'un tel modèle.

Chapitre 9

Des modèles thématiques unitaires au modèle couplé

Sommaire

9.1	Introduction	235
9.2	Matériel et méthodes	236
9.2.1	Démarche générale	236
9.2.2	La plateforme OpenFLUID	237
9.3	Résultats	238
9.3.1	Principes techniques de couplage entre DIESE et OpenFLUID	238
9.3.2	Fonctionnement dynamique du couplage	240
9.3.3	Sur la compatibilité des échelles spatiales des modèles	241
9.3.3.1	L'unité spatiale pour la modélisation	241
9.3.3.2	Le périmètre d'étude de la modélisation	242
9.3.4	Architecture du modèle couplé : les composants et leurs interactions	245
9.3.4.1	Les composants du modèle couplé	245
9.3.4.2	Les interactions entre processus biophysiques et de gestion technique	246
9.3.4.3	Les interactions entre processus biophysiques	247
9.4	Discussion et conclusion	248

Chapitre 9

Des modèles thématiques unitaires au modèle couplé

9.1 Introduction

L'influence des pratiques culturales sur le fonctionnement hydrologique de l'agro-écosystème passe par des modifications dans l'espace et dans le temps de l'état du système. Dans le cadre de notre problématique de pollution de l'eau par les pesticides en milieu viticole, deux variables ont été identifiées qui, modifiées par les actions culturales des viticulteurs, définissent les impacts hydrologiques de l'agrosystème : l'infiltrabilité de la surface du sol et la concentration en matières actives au sol. L'importance des pratiques et la nature de l'objet de l'étude nous ont amené à chercher à développer un outil d'expérimentation virtuelle pour les écosystèmes viticoles languedociens. Pour ce faire, les processus agro-techniques qui conditionnent les actions culturales ont été étudiés et modélisés. On s'est également intéressé aux processus biophysiques qui conditionnent la réalisation de ces actions (indicateurs) et à ceux qui font évoluer l'infiltrabilité après sa modification liée aux actions agricoles (évolution de l'état de surface du sol). On a ainsi développé différents modèles thématiques unitaires pour l'ensemble des processus qui nous paraissaient influencer sur les impacts hydrologiques que l'on cherche à évaluer. La figure 9.1 présente ainsi l'application du modèle conceptuel de l'agro-écosystème sur lequel s'est appuyé notre démarche. On présente dans cette partie le couplage de ces différents modèles pour produire un outil d'expérimentation virtuelle.

Le couplage des modèles a pour objet la représentation d'un système complexe qu'est un écosystème cultivé. Le fonctionnement d'un tel système est piloté par des processus anthropiques et biophysiques qui se réalisent à des échelles de temps et d'espace différentes et qui interagissent les uns avec les autres. Le couplage de modèles que l'on cherche à mettre en oeuvre doit donc intégrer cette caractéristique multi-échelles du système et permettre la représentation des interactions existantes entre les différents processus. Cela suppose d'identifier et de surmonter les problèmes conceptuels éventuels liés au couplage, mais aussi de rechercher des outils informatiques permettant la réalisation d'un tel couplage.

Au plan conceptuel du couplage, notre démarche de modélisation de l'agro-écosystème à partir d'un modèle hydrologique existant a permis de considérer, lors du développement des nouveaux modèles, les futurs besoins liés au couplage. On est parti de la représentation globale du système et, en connaissance de l'architecture à lui donner, on a développé les modèles complémentaires. Cela a permis d'assurer en grande partie la compatibilité conceptuelle entre modèles (comparé à des approches de couplage de modèles disciplinaires existants et développés indépendamment), mais n'a pas résolu tout problème de compatibilité en ce qui

concerne le modèle hydrologique, développé antérieurement. On verra ainsi dans la suite, que des modifications ont dû être réalisées sur le modèle hydrologique pour permettre le couplage.

Au plan technique, le couplage a posé la question de l'environnement informatique adapté à nos besoins. Dans les vingt dernières années, peu de cadres ou de plateformes de modélisation ont été développés dans le but de gérer différents types de processus, d'échelles voire de formalismes, (voir Argent, 2004 pour une revue plus complète et un historique) e.g. Spatial Modelling Environment (SME, Maxwell et Constanza, 1997) ; The Invisible Modelling Environment (TIME, <http://www.toolkit.net.au/Tools/TIME>) et ses outils dérivés pour l'hydrologie comme E2 (Argent et al., 2009) ; Object Modeling System (OMS, Kralisch et al., 2005) ; OpenMI (Moore et Tindall, 2005) utilisé par la plateforme SEAMLESS et plus récemment la plateforme RECORD développée au sein de l'INRA. La plateforme OpenFLUID avait donc été développée pour pallier les manques de la plupart des plateformes citées précédemment sur leurs capacités à intégrer des approches de modélisation pluri-disciplinaires dans un cadre de modélisation du paysage ou à gérer des échelles multiples. Nous situant dans un cadre de modélisation du paysage et la plateforme OpenFLUID abritant déjà le modèle hydrologique MHYDAS que l'on utilise pour le couplage, c'est elle qui a été utilisée pour abriter le modèle couplé. On présente plus en détail dans les parties suivantes la plateforme ainsi que les raisons de ce choix.

9.2 Matériel et méthodes

9.2.1 Démarche générale

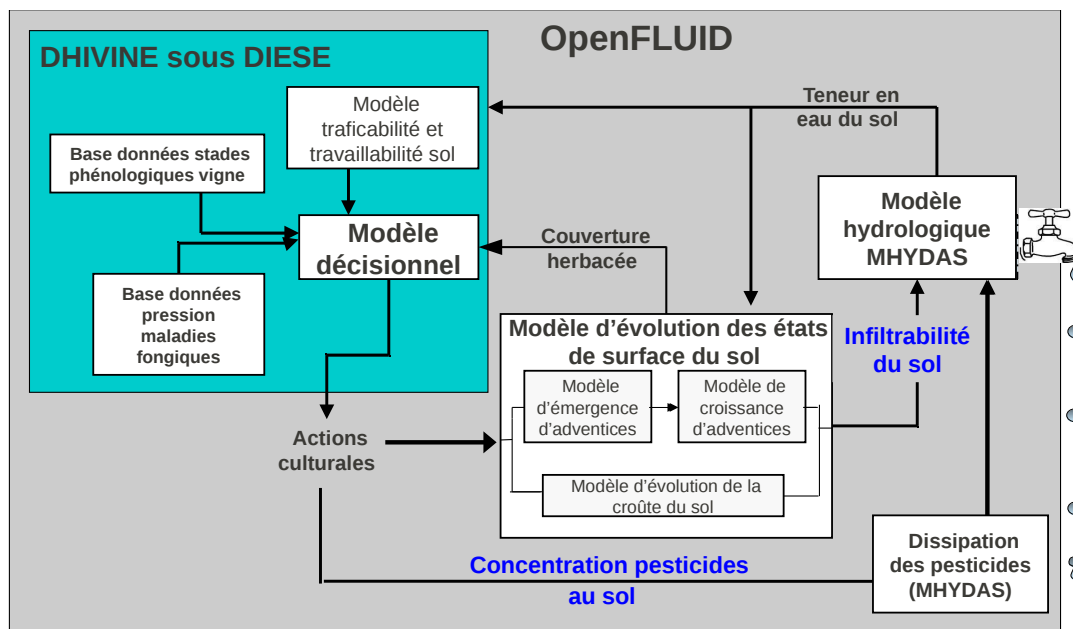


FIGURE 9.1 – Schéma du modèle conceptuel appliqué au cas d'étude

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

Le schéma du modèle conceptuel appliqué au cas d'étude présenté à la figure 9.1 montre que la majorité des modèles biophysiques ont été développés sous l'environnement OpenFLUID. Il

montre que des interactions existent entre ces modèles via l'échange de variables (teneur en eau du sol, concentration de pesticides au sol, infiltrabilité du sol). Par ailleurs, on peut voir que le modèle décisionnel DHIVINE développé sous l'environnement DIESE (cf chapitre 3) est en interaction avec différents modèles biophysiques sous OpenFLUID. La démarche générale mise en oeuvre pour le couplage des modèles va donc consister à permettre, dans l'environnement OpenFLUID, ces interactions entre les différents modèles en tenant compte des différentes échelles des processus. La majeure partie du couplage va ainsi consister à mettre en relation les deux environnements de modélisation : DIESE et OpenFLUID.

L'environnement DIESE est présenté au chapitre 3. On présente donc ci-dessous les caractéristiques de la plateforme OpenFLUID qui abrite le modèle couplé.

9.2.2 La plateforme OpenFLUID

La plateforme OpenFLUID a été développée dans l'objectif de modéliser et simuler des flux dans des paysages cultivés. Cette caractéristique a conduit à orienter le développement de la plateforme vers la possibilité d'intégrer des modèles hétérogènes (disciplines, formalismes, ...) et vers une approche de modélisation spatiale distribuée capable de prendre en compte les objets du paysage (parcelles, fossés, ...) en tant qu'unités spatiales de modélisation. La méthode de discrétisation du paysage s'appuie donc sur une segmentation spatiale qui prend en compte les irrégularités et les formes complexes des objets du paysage cultivé. Le paysage est ainsi représenté par un graphe dont les noeuds sont des unités spatiales et les lignes entre les noeuds, les connexions entre ces unités. Sous OpenFLUID, les modèles appliqués à cette représentation numérique du paysage sont des compositions de fonctions élémentaires, qui simulent chacune, dynamiquement et à un pas de temps propre, des variables sur une ou plusieurs classes d'unités spatiales.

Le composant majeur de la plateforme est le moteur : OpenFLUID-engine, développé avec le langage C++, qui fait tourner les simulations de modèles, constitués de fonctions couplées pour la représentation des flux et processus et appliqués à une représentation numérique donnée de l'espace (fonction du paysage étudié). Il assure ainsi l'exécution des codes de calcul branchés dynamiquement au noyau logiciel qui supervise la simulation spatio-temporelle des processus. L'exécution de la simulation comprend la mobilisation des fonctions de simulation (en fonction du modèle défini), la gestion du temps et de l'espace, la vérification de cohérence du modèle et de la simulation, les échanges et le contrôle de données, les entrées-sorties.

Une fonction de simulation signe son comportement, en précisant notamment les données consommées et produites. Elle donne des indications au noyau qui seront utilisées lors de la vérification de cohérence du modèle à exécuter. Un modèle de flux OpenFLUID est construit à partir des fonctions de simulation disponibles. Un modèle est considéré comme cohérent si toutes les dépendances de données entre fonctions de simulation sont satisfaites.

Au travers du SDK -Source Development Kit- d'OpenFLUID-engine, la plateforme offre la possibilité de développer ses propres fonctions de simulation, soit par une écriture complète du code de calcul, soit en encapsulant un code de calcul existant.

La plateforme OpenFLUID possède donc une architecture modulaire ouverte qui permet de former un modèle avec des fonctions représentant différents processus. C'est ainsi qu'ont été conçues différentes versions du modèle MHYDAS, incluant au fil du temps un plus grand nombre et/ou des combinaisons variables de fonctions élémentaires : MHYDAS (Moussa et al., 2002), MHYDAS-érosion (Gumiere et al., 2009); MHYDAS-polluant (Louchart et al., en cours), etc. L'appellation générique MHYDAS correspond à l'emploi partagé par tous les

modèles ainsi nommés d'une représentation de l'espace agricole reposant sur des principes de base communs (Moussa et al., 2002 ; Lagacherie et al., 2010). On notera toutefois que la plateforme OpenFLUID, si elle a été jusqu'à présent majoritairement utilisée pour produire des modèles appartenant à la lignée MHYDAS, a également la capacité à produire d'autres types de modélisations des flux dans un paysage cultivé. On définira dans la partie suivante les fonctions hydrologiques mises en oeuvre dans le couplage.

9.3 Résultats

9.3.1 Principes techniques de couplage entre DIESE et OpenFLUID

Pour mettre en oeuvre une représentation intégrée de l'agro-écosystème via la modélisation couplée des différents processus biophysiques, hydrologiques et de gestion technique, il a été mis en oeuvre un couplage synchrone entre les deux simulateurs, l'un développé sous DIESE et l'autre sous OpenFLUID :

- « couplage » : pour bénéficier des savoir-faire respectifs (DIESE sur la simulation de la conduite du système de production, OpenFLUID sur la simulation de processus distribués sur une structure spatiale) ;
- « synchrone » : parce que, comme on a pu le voir, le fonctionnement du système global étudié est très dépendant de l'interaction entre les dynamiques aux deux échelles, temporelle et spatiale.

Le couple de simulateurs devient alors un logiciel dont les simulateurs sont les composants.

Un élément technique fondamental du couplage est que les deux environnements sont programmés en C++. Le couplage peut alors reposer sur la mise à disposition mutuelle des bibliothèques de références (variables, fonctions, classes). Par exemple, la simulation OpenFLUID peut instancier une classe définie dans la base de connaissances DIESE ; la valeur renvoyée par une fonction définie dans DIESE peut être exploitée par la simulation OpenFLUID, etc.

Une deuxième considération a porté sur le contrôle de l'exécution. Les simulateurs développés sous DIESE et OpenFLUID étaient des programmes exécutables, fermés sur des entrées/sorties définies avant l'exécution (même si c'est de manière fonctionnelle), et autonomes au sens où le contrôle de la simulation ne relève pas du tout d'un autre composant logiciel. Pour la synchronisation entre les composants DIESE et OpenFLUID, il a été choisi que le simulateur DIESE abandonne au moins une partie de son contrôle au moteur OpenFLUID, qui devient le superviseur. En effet, même si les deux plateformes possèdent la fonctionnalité de supervision de dynamiques « parallèles », il a semblé plus naturel de donner le rôle de supervision au composant OpenFLUID car c'est celui qui opère au niveau d'intégration le plus élevé.

Une troisième considération porte sur l'échange d'information entre les deux composants DIESE et OpenFLUID, en termes de protocole et de format, et compte tenu de l'option prise sur la supervision. La simulation OpenFluid est rythmée par un « pas d'échange ». Cet échange-là s'entend entre les différentes fonctions incluses dans le simulateur biophysique. La simulation OpenFluid est une séquence d'épisodes, de durées toutes égales au pas d'échange, au terme desquels les échanges d'information entre sous-modèles sont possibles, exclusivement.

Pour que l'échange d'information avec la simulation DIESE s'inscrive dans ce schéma, celle-ci doit pouvoir être mise en pause en des instants pertinents, c'est-à-dire où des échanges entre le modèle OpenFluid et le modèle DIESE sont utiles ou nécessaires à l'un ou à l'autre des

deux composants. Une fois les échanges réalisés, la simulation DIESE est poursuivie jusqu'au prochain moment pertinent pour l'échange. La détermination de ces moments pertinents est présentée et justifiée dans la section suivante.

En ce qui concerne les formats d'échanges de données entre DIESE et OpenFLUID, l'option a été choisie en conformité avec la conception générale de DIESE : on ferme le langage (lexique et grammaire) pour pouvoir automatiser son traitement. Plus précisément, et appliqué à la communication entre DIESE et OpenFLUID, il a été mis en place une structure de données unique qui est le véhicule de tous les échanges d'information. DIESE fournit tous les services de traitement de cette structure (instanciation, chargement en valeurs, accès à ces valeurs).

Cet ensemble d'options a entraîné :

- La définition d'une fonction de simulation OpenFLUID en charge du couplage. Elle lance les épisodes de simulation de DIESE, gère les tableaux « *in* » et « *out* » pour l'échange des données (initialisation, construction en cours de simulation) et elle rend disponibles les informations en provenance de DIESE aux autres fonctions de simulations OpenFLUID.
- La réalisation d'une extension de DIESE, dédiée au développement de simulateurs contrôlables par un logiciel tiers, et capables d'échanger des informations avec lui. Cette extension est appelée OPEN DIESE.

OPEN DIESE est une librairie de classes qui héritent de certaines déjà définies dans la couche BASIC DIESE (une présentation détaillée de cette extension est dans la documentation en ligne de DIESE, <http://carlit.toulouse.inra.fr/diese/>).

L'abandon partiel du contrôle de la simulation au partenaire (tel OpenFLUID) se traduit par une nouvelle implémentation de la méthode majeure du moteur de simulation de DIESE qui traite l'agenda d'événements discrets jusqu'à son épuisement : la méthode *Run()* de la classe *Simulation*. La couche OPEN DIESE fournit la méthode *RunOpenSimulationToDate*, dont un des arguments est la date au-delà de laquelle les événements de l'agenda ne seront pas considérés. Dans le cas du couplage avec OpenFLUID, ce sera l'instant de fin de l'épisode de simulation OpenFLUID en cours, c'est-à-dire le prochain « moment d'échange ».

La structure de données qui est l'unique vecteur des échanges est la classe *InterfaceDataItem*. Elle encapsule la définition de l'information échangée, en termes :

- d'entité DIESE ciblée et de descripteur visé pour cette entité (qui ?) ;
- de valeur transmise (quoi ?) ;
- et enfin de point dans le temps auquel cette valeur se rapporte (quand ?).

Par exemple, DHIVINE passe à MHYDAS des informations du type :

- le descripteur *LastOperationMemoryAttribute* de l'entité DIESE *Row* (rangée) ;
- qui a pour valeur un ensemble d'instances de la classe *LastPesticideApplicationsMemoryItem* possédant un ensemble d'attributs (dont *HerbicideType* qui a pour valeur « *post_levee* ») ;
- à la date '2005-03-10 10 :00 :00'.

Selon qu'une instance de cette structure doit véhiculer l'information dans le sens OpenFLUID vers DIESE ou le sens inverse, elle est rangée, respectivement, dans le tableau « *in* » ou le tableau « *out* », qui sont deux arguments supplémentaires de *RunOpenSimulationToDate*.

La simulation OPEN DIESE est donc une sorte de fonction, appelée par un programme client, qui prend en entrée sa période d'intervention et d'éventuelles spécifications de valeurs de variables d'état, et qui renvoie d'éventuelles valeurs de variables d'état et un signal booléen indiquant au programme client que l'agenda DIESE est devenu vide ou non. OpenFLUID appelle cette fonction au rythme de son pas d'échange, tant que le signal booléen est 'faux'.

En conclusion, le principe de base du couplage repose sur le partage de mémoire entre DIESE et OpenFLUID grâce à une édition de liens qui permet à chacun des deux composants d'accéder aux éléments de l'autre. OpenFLUID est le superviseur de la simulation, il lance DIESE au début de son premier épisode de simulation (au temps t). DIESE s'arrête à une date donnée ($t + \Delta t$), définie par l'utilisateur via la méthode *RunOpenSimulationToDate*. Des échanges d'informations entre DIESE et OpenFLUID peuvent alors avoir lieu dans les deux sens via les structures fournies par DIESE : les classe *InterfaceDataItem*. Les informations échangées permettent de définir « qui/quoi a quelle valeur et quand ? ». Après ce « moment d'échange », OpenFLUID progresse jusqu'à $t + \Delta t$ puis DIESE est de nouveau lancé par OpenFLUID, etc... jusqu'à la date de fin de simulation (commune pour les deux composants DIESE et OpenFLUID du simulateur couplé).

9.3.2 Fonctionnement dynamique du couplage

Les fonctions de simulation biophysiques sous OpenFLUID n'ont pas toutes le même pas de temps de calcul : par exemple la germination et la croissance des adventices sont modélisées au pas de temps journalier quand les processus hydrologiques peuvent avoir cours au pas de temps de la minute. Comme signalé plus haut, la plateforme gère ces différences de pas de temps des différents codes de calcul. Par exemple, si une simulation débute à 14h un jour donné, les variables de sorties de certaines fonctions de simulation seront remises à jour à 14h tous les jours et dans l'intervalle les valeurs éventuellement utilisées par les autres fonctions demeureront fixes. Il n'y a donc pas de problème technique lié aux différentes échelles de temps entre les différents modèles biophysiques internes à OpenFLUID.

Dans le cadre du couplage entre DIESE et OpenFLUID, il faut déterminer quels sont, au cours des deux simulations couplées OpenFluid et DIESE, les moments auxquels l'un ou l'autre des composants doit actualiser la "vision" qu'il a de l'état géré par l'autre.

DHIVINE simule les actions culturelles au pas de temps de l'heure mais le modèle s'appuie sur le pas de temps de la journée pour remettre à jour le programme de travail. Tout se passe comme si le viticulteur réactualisait son agenda le matin suite à la prise d'information. Il faut donc, pour le moins, que la simulation DIESE soit mise en pause quand son horloge marque le matin, et récupère alors, dans l'ensemble des variables d'état d'OpenFluid, celles qui constituent ses indicateurs d'action. En complément à ces rendez-vous réguliers, le modèle décisionnel prévoit des réactualisations intermédiaires, s'il s'avère nécessaire de mettre à jour les informations biophysiques. Dans l'autre sens, OpenFluid doit réagir immédiatement à toutes les interventions culturelles pour orienter son modèle d'évolution des états de surface.

Au total, il serait pertinent que les épisodes de simulation DIESE soient bornés par les instants des opérations culturelles intéressant OpenFluid, plus les instants précédant immédiatement les réactualisations matinales et intermédiaires de l'agenda. Cependant, pour gagner en efficacité calculatoire, sans dégrader les autres qualités du simulateur, on a mis en place le protocole cyclique suivant (figure 9.2) :

1. en cours de de simulation DIESE, une de ses procédures enregistre les caractéristiques des opérations culturelles (date, lieu, nature, outils) quand elles se terminent ;
2. l'épisode de simulation DIESE en cours, commencé en ' t ', s'arrête en ' $t + D$ ' quand va intervenir une réactualisation matinale ou intermédiaire de l'agenda ;
3. DIESE transmet alors à OpenFluid les informations enregistrées sur les opérations culturelles entre ' t ' et ' $t + D$ ' ;

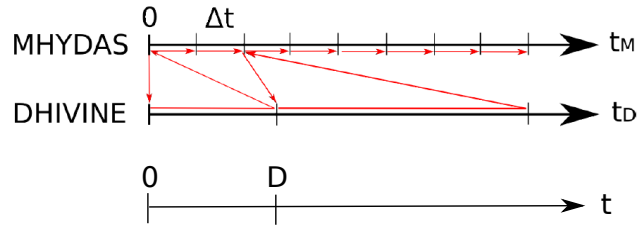


FIGURE 9.2 – Gestion dynamique du couplage MHYDAS-DHIVINE

4. le dernier épisode de simulation OpenFLUID en date, qui s'était arrêté en ' t ', passe le relais à un nouvel épisode qui couvre l'intervalle ' t ' ' $t+D$ ': les informations préalablement calculées et transmises par DIESE sont mobilisées ;
5. une fois ' $t+D$ ' atteint par OpenFLUID, celui-ci relance un épisode de simulation DIESE : retour en 1.

On voit que la mémorisation des opérations culturales en cours de simulation DIESE "économise" les moments d'échanges qui ne seraient relatifs qu'à une opération individuelle.

9.3.3 Sur la compatibilité des échelles spatiales des modèles

On a vu dans le chapitre 3 que le modèle DHIVINE s'appuie sur des échelles spatiales emboîtées. La première est l'ensemble des territoires des exploitations agricoles qui cultivent au moins une des parcelles du bassin versant correspondant à l'agro-écosystème que l'on cherche à représenter. Un autre niveau est celui de la parcelle culturale. Puis le niveau le plus fin est défini par les rangées des parcelles. Les parcelles sont ainsi structurées selon un motif composé de différents types de rangées. Quatre types de rangées sont définis : 2 types de rangs et 2 types d'inter-rangs, cela permet de différencier le comportement biophysique des rangées et de représenter les recours à des pratiques mixtes d'entretien du sol au sein d'une même parcelle.

Sous la plateforme OpenFLUID, l'échelle spatiale de modélisation est le bassin versant et une unité spatiale est un objet homogène du point de vue de ses propriétés et de son fonctionnement. L'unité dépend donc des processus simulés par le modèle utilisé.

En l'occurrence, l'unité spatiale de MHYDAS est l'unité hydrologique. son découpage est réalisé à partir de couches d'informations telles que les parcelles culturales, la pente, l'occupation du sol, le type de sol, etc. L'unité hydrologique peut donc être considérée comme une sous-unité de la parcelle culturale mais l'unité hydrologique ne s'appuie pas sur les éventuelles différences internes liées aux pratiques culturales.

9.3.3.1 L'unité spatiale pour la modélisation

Dans le cadre du couplage, différentes possibilités ont été envisagées pour résoudre la question d'échelles spatiales de natures différentes pour les unités spatiales. On les présente ici :

- intégrer l'échelle de la rangée dans MHYDAS : la prise en compte de cette échelle nécessiterait, pour les besoins de MHYDAS, de pouvoir définir les relations topologiques entre les rangées et entre les rangées et les unités. Mais cette information est difficilement accessible et peut introduire des incohérences dans la représentation des processus ;

- intégrer l'échelle de l'unité hydrologique dans DHIVINE : l'utilisation de la parcelle hydrologique sous DHIVINE nécessiterait alors un redécoupage des parcelles culturales. Ce redécoupage peut introduire des incohérences telles qu'une opération culturale effectuée sur une partie seulement de la parcelle culturale (par exemple, l'unité hydrologique dépendant du type de sol, on pourrait définir qu'une partie d'une vigne sur un sol argileux n'est pas traitée car non traficable alors que l'autre partie sur un autre type de sol aurait été considérée comme opérable et donc opérée).
- adopter l'échelle de la parcelle culturale : pour les deux modèles, la parcelle hydrologique est l'échelle pertinente la plus grande. Cependant une agglomération des unités hydrologiques pour MHYDAS et des rangées pour DHIVINE rendrait incohérents les processus respectifs des modèles.

Il est donc apparu que les parcelles culturales et les unités hydrologiques devaient nécessairement rester les unités spatiales respectives de DHIVINE et de MHYDAS. Le couplage repose alors sur l'hypothèse qu'une unité hydrologique MHYDAS est connectée à une unique parcelle culturale représentée sous DHIVINE. Par contre une parcelle culturale peut être connectée à plusieurs unités hydrologiques. La structure de la parcelle par 4 types de rangées définies sous DHIVINE est alors reportée sur les unités hydrologiques de MHYDAS mais sans segmentation formelle. Chaque unité hydrologique se voit définir des sous-unités à l'échelle desquelles les processus hydrologiques seront traités statiquement (sans échanges latéraux avec des sous-unités voisines) puis l'information sera réaggrégée pour simuler les interactions avec les unités voisines. Concrètement, les processus verticaux sont traités parallèlement et les résultats sont agrégés pour le traitement des processus horizontaux.

Dans le cadre des échanges d'informations, ce choix conduit MHYDAS à fournir à DHIVINE des vecteurs de valeurs pour une rangée : les différentes valeurs correspondent aux différentes unités hydrologiques associées à la parcelle culturale et donc à la rangée. Quant à DHIVINE, il fournit à OpenFLUID des actions ou des informations situées par rapport aux rangées et la mise en oeuvre des processus biophysiques est adaptée. Cette adaptation des processus biophysiques sous OpenFLUID à l'échelle spatiale du modèle DHIVINE a nécessité des modifications des fonctions de simulation. En effet, toutes les fonctions de simulation qui modifiaient ou produisaient des variables à transmettre au modèle DHIVINE devaient intégrer le découpage des calculs des processus selon les sous-unités hydrologiques liées aux rangées. Cela pose donc des questions de choix de réaggrégation des valeurs d'une variable donnée : est-ce que si on fait la somme des valeurs des variables calculées en parallèle sur les sous-unités on retrouve la valeur de la variable calculée à l'échelle de l'unité hydrologique ? Des adaptations ont ainsi été réalisées en posant l'hypothèse que la réponse à la question précédente était positive pour les flux d'eau. Cependant pour la simulation des flux de polluants et compte tenu de la présence de processus de dégradation des molécules, l'hypothèse méritait d'être investiguée avant d'être adoptée, ce qui n'a pas pu être fait à ce jour. Par conséquent, le modèle couplé se limite pour le moment à la simulation des flux d'eau.

9.3.3.2 Le périmètre d'étude de la modélisation

Les deux modèles DHIVINE et MHYDAS ne considèrent pas le même périmètre d'étude. Le territoire de modélisation de DHIVINE, qui est une somme de territoires d'exploitation, est discontinu par nature et va au-delà des frontières du bassin versant modélisé par MHYDAS (figure 9.3) qui traite de processus dans un système « clos » dans le sens où les unités aux limites ne sont pas influencées par des unités externes.

On a pu voir dans le chapitre 3 que le modèle DHIVINE exploitait des indicateurs pour la décision. On a également signalé que ces indicateurs biophysiques avaient pour vocation d'être produits par les modèles biophysiques sous OpenFLUID. On présente plus en détail les interactions et les variables échangées dans la partie suivante mais on peut d'ores et déjà affirmer que, la modélisation des actions étant située à l'échelle de l'exploitation, ces indicateurs demandés par le modèle DHIVINE, le sont pour l'ensemble des parcelles de l'exploitation (et pas seulement pour celles se situant sur le bassin versant). Par conséquent le couplage des modèles pose une deuxième question de compatibilité des échelles spatiales des modèles, celle-ci portant sur le périmètre de modélisation.

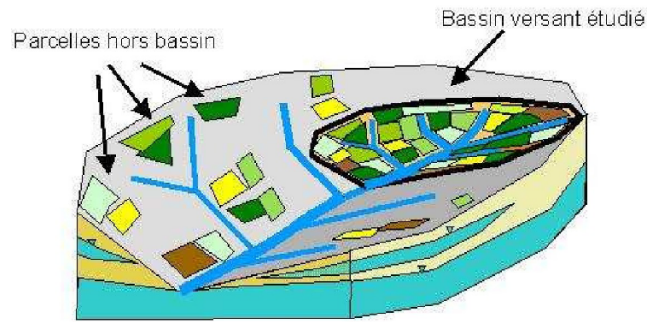


FIGURE 9.3 – Périmètres d'études de MHYDAS et DHIVINE

Dans l'idéal, pour l'étude d'un bassin versant donné (ou d'un certain nombre d'exploitations viticoles), il est nécessaire de simuler sous DHIVINE, l'ensemble des parcelles culturelles des exploitants concernés. Certaines de ces parcelles peuvent être « externes » au bassin versant d'étude. Etant donné que le comportement hydrologique de ces parcelles dépend potentiellement des parcelles situées en amont (au sens hydrologique), il faudrait également simuler sous MHYDAS les bassins versants définis par l'exutoire de ces parcelles « externes ». Or les comportements de ces nouveaux bassins versants sont eux-mêmes influencés par les décisions d'autres exploitants possédant d'autres parcelles. L'extension du site d'étude peut potentiellement être illimitée.

Si l'extension du site d'étude est trop importante, il est nécessaire de faire des hypothèses qui permettent de restreindre le domaine d'étude. Etant donné que la suppression d'une parcelle d'un exploitant peut perturber considérablement la modélisation des actions, il semble préférable de faire des hypothèses sur le comportement bio-physique des unités « externes ». Deux solutions peuvent alors être utilisées :

- Le périmètre d'étude de MHYDAS est le bassin versant englobant l'ensemble des parcelles sur lesquelles sont modélisées les décisions. On fait alors des hypothèses sur les pratiques des parcelles pour lesquelles les actions culturales ne sont pas simulées sous DHIVINE ;
- On restreint la modélisation bio-physique au bassin versant étudié et on intègre uniquement les parcelles « externes » (nécessaires à la modélisation des actions culturales) en faisant l'hypothèse qu'elles ne sont soumises à aucune influence biophysique de l'amont. Un simple bilan hydrique statique sera alors effectué (pluie, évapo-transpiration, infiltration, ruissellement mais sans transfert provenant de l'amont) sur ces parcelles.

La deuxième solution est celle qui est envisagée pour le couplage mis en place entre DHIVINE et MHYDAS. Dans le cadre de la thèse, une modélisation impliquant l'ensemble d'un bassin versant n'a toutefois pas été mise en oeuvre car le modèle se trouve encore au stade de l'évaluation et que les informations nécessaires à la modélisation des actions culturales pour tester le modèle sur un bassin versant entier n'étaient pas suffisantes. Par conséquent, on n'a pas cherché au stade actuel à représenter les flux horizontaux et on a généralisé la

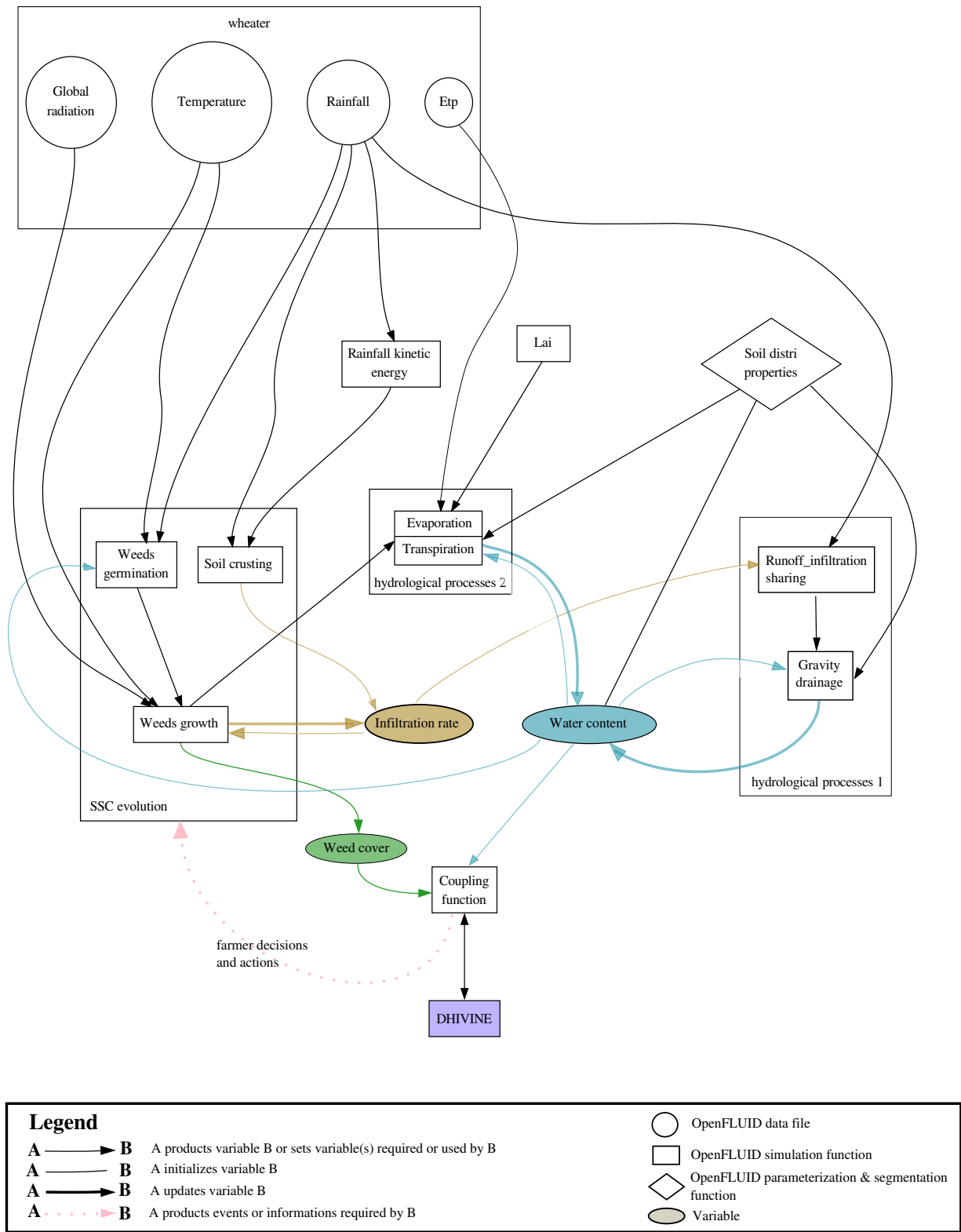


FIGURE 9.4 – Diagramme du modèle couplé DHIVINE-MHYDAS

simplification des processus hydrologiques telle que prévue pour les parcelles « externes », à toutes les parcelles qui constituent le domaine d'étude.

9.3.4 Architecture du modèle couplé : les composants et leurs interactions

9.3.4.1 Les composants du modèle couplé

La figure 9.4 présente le diagramme du modèle couplé avec les liens entre les différents composants du modèle. On peut voir qu'il ne concerne, sur la partie biophysique, que les processus liés aux flux d'eau et non aux flux de polluants. On a expliqué précédemment les raisons, liées au couplage, de cette restriction de la représentation du modèle couplé. Par ailleurs, on ne présente pas non plus sur ce diagramme les fonctions de simulation de transfert d'eau sur les parcelles, car elles n'ont pas été mises en oeuvre dans le cadre de la thèse.

Les trois pôles majeurs présents dans le schéma du modèle conceptuel se retrouvent dans le modèle :

- le pôle hydrologique avec la modélisation d'une part du partage infiltration/ruissellement et le drainage gravitaire (cadre *hydrological processes 1*) et d'autre part des processus d'évapo-transpiration (cadre *hydrological processes 2*) qui définit le modèle *MHYDAS* pour notre cas d'étude ;
- le pôle décisionnel avec le modèle *DHIVINE*, développé dans le cadre de la thèse, qui a été présenté au chapitre 3 ;
- le pôle d'évolution de l'infiltrabilité sous l'effet des changements d'états de surface soumis à des processus biophysiques (cadre *SSC evolution*) et qui est composé d'une fonction pour la modélisation de l'état de surface des sols nus travaillés (*Soil crusting*), d'une fonction pour la modélisation de la germination des adventices (*Weeds germination*) et d'une fonction pour la modélisation de la croissance des adventices (*Weeds growth*). Ces fonctions, développées dans le cadre de la thèse, sont basées sur les modèles présentés aux chapitres 4 et 6.

Les fonctions de simulation *OpenFLUID* qui constituent le modèle *MHYDAS* ainsi que les fonctions de simulation développées pour la modélisation de l'évolution de l'infiltrabilité nécessitent des variables d'entrées fournies par d'autres fonctions de simulation :

- des fonctions qui gèrent les variables climatiques (cadre *weather*) ;
- une fonction qui calcule l'énergie cinétique de la pluie : *Rainfall kinetic energy* ;
- une fonction de segmentation du sol en couches et de paramétrisation des variables caractéristiques du sol : *Soil distri properties* ;
- une fonction qui représente la dynamique du LAI de la vigne : *LAI*.

Les fonctions climatiques exploitent des fichiers de paramètres climatiques pour les rendre disponibles à l'ensemble des fonctions qui y font appel.

La fonction qui calcule, à chaque pas de temps, l'énergie cinétique de la pluie, E ($J/m^2/mm$), utilise l'équation de Zanchi et Torri (1980) : $E = 9.81 + 11.25 \log(I)$ qui exprime E en fonction de l'intensité de la pluie I (mm/h). Elle permet ainsi à la fonction *Soil crusting*, qui met en oeuvre une régression logistique (cf chapitre 4) pour simuler la dynamique des états de surface sur sols nus, de calculer le cumul d'énergie cinétique de la pluie à partir de la date d'occurrence du travail du sol.

La fonction *Soil distri properties* est une fonction qui fait appel à une base de données SQL. Cette base correspond à un tableau informant pour chaque couche de sol que l'on définit,

l'ensemble des paramètres qui caractérisent le sol. La fonction rend disponible ces paramètres à l'ensemble des fonctions qui le demandent. Les paramètres contenus dans la base sont, par exemple, la teneur en eau, la teneur en eau à la capacité au champ, la teneur en eau résiduelle, la conductivité hydraulique à saturation...

La fonction *LAI* fournit des valeurs de *LAI* (Leaf Area Index) de la vigne à destination des fonctions qui calculent l'évaporation et la transpiration. Les valeurs sont issues de mesures effectuées sur une parcelle de vigne conduite en gobelet non palissé et située sur le bassin versant de Roujan. Elles sont donc fixes quel que soit le climat et communes à toutes les parcelles de vignes quelle que soit la conduite et donc l'organisation du feuillage.

9.3.4.2 Les interactions entre processus biophysiques et de gestion technique

On a présenté plus haut les principes techniques des échanges d'informations entre DHIVINE développé sous DIESE et la plateforme OpenFLUID. On présente ici la teneur de ces échanges.

Tout d'abord on peut voir que la fonction de simulation pour le couplage (*Coupling function*) joue le rôle d'interface entre DHIVINE et les fonctions de simulation OpenFLUID. Elle gère ainsi deux types d'échanges :

- un premier dans le sens DHIVINE vers OpenFLUID qui concerne les actions culturales et des informations agronomiques produites par DHIVINE et qui permet d'informer les fonctions de simulation des états de surface du sol (flèche pointillé rose) ;
- un second dans le sens OpenFLUID vers DHIVINE qui concerne l'information sur des variables d'état du système : la couverture herbacée du sol et la teneur en eau de la surface du sol, qui constituent des indicateurs pour l'action modélisée dans DHIVINE.

DHIVINE vers OpenFLUID :

Les informations fournies par DHIVINE à OpenFLUID sont de deux natures : des informations sur des propriétés statiques des parcelles transmises au premier épisode de simulation ; des informations sur les événements d'actions culturales transmises lors des échanges entre les épisodes de simulation suivants.

En début de simulation, DHIVINE fournit des informations, qui demeureront constantes dans le temps, sur le type de modalité d'entretien du sol et la surface relative (par rapport à la parcelle) de chaque rangée de chaque parcelle en se basant sur le découpage spatial défini dans le modèle DHIVINE (chapitre 3). Ces informations permettent donc de caractériser les motifs spatiaux d'entretien du sol de l'ensemble des parcelles. On rappelle que le découpage spatial des parcelles dans DHIVINE définit 4 types de rangées : 2 types de rangs et 2 types d'inter-rangs. La définition des types de rangées s'appuyant sur leurs propriétés biophysiques et leur modalité de gestion, les 4 modalités ne sont pas toujours toutes présentes dans une parcelle. Cependant, une parcelle est au minimum constituée d'un type de rang et d'un type d'inter-rang.

Pour chaque rangée, DHIVINE indique quelle est sa représentativité par rapport à la surface totale de la parcelle et quelle est sa modalité d'entretien, pour laquelle il existe cinq modalités : travail du sol ; désherbage chimique ; combinaison désherbage chimique et travail du sol ; enherbement permanent ; aucune. Cette dernière modalité est forcément associée à une surface relative nulle de la rangée en question.

En cours de simulation, DHIVINE informe OpenFLUID de toutes les actions culturales impliquant soit un travail du sol, soit une application de pesticides en indiquant le ou les

type(s) de rangée(s) de la parcelle concernée et une date correspondant à la date de fin de réalisation de l'action sur la parcelle.

Dans le cas de travail du sol, DHIVINE informe sur l'outil utilisé.

Dans le cas d'application de pesticides, il est prévu que DHIVINE informe sur le type de pesticide (anti-oïdium, herbicide post-levée, ...), le nom de la molécule, la dose de produit, le type de pulvérisateur et le pourcentage de la surface de la rangée concernée. Actuellement les molécules et les doses ne sont pas informés par DHIVINE, seul le type de pesticide est donné.

OpenFLUID vers DHIVINE :

OpenFLUID fournit deux types d'informations à DHIVINE : la couverture herbacée du sol (%) et la teneur volumique en eau de la couche de surface du sol (m^3/m^3). On a pu voir dans les chapitres précédents que ces deux variables constituent des indicateurs pour l'action.

Sous OpenFLUID ces variables produites à l'échelle de l'unité hydrologique sont fournies à DHIVINE à l'échelle de la rangée. Par conséquent, comme une parcelle culturale, et donc une rangée, peut être constituée de plusieurs unités hydrologiques, OpenFLUID fournit un vecteur de valeurs pour chaque variable.

9.3.4.3 Les interactions entre processus biophysiques

Ce paragraphe présente les interactions, dans le modèle couplé, entre les différentes fonctions de simulation OpenFLUID.

Les *flèches en noir* sur le diagramme de la figure 9.4 indiquent des échanges de variables entre les fonctions de simulation OpenFLUID. En effet, chaque fonction OpenFLUID précise ses variables d'entrée et de sorties qui dépendent des processus qu'elle modélise. On peut voir que la majorité de ces flèches représentent la fourniture de variables d'entrées aux fonctions biophysiques en provenance des fonctions climatiques ou de caractérisation du sol ou de la vigne. Trois flèches concernent des échanges de variables et donc des interactions entre fonctions biophysiques (de gauche à droite) :

- l'interaction entre la fonction de simulation de la germination et celle de la croissance : comme exposé au chapitre 6, le modèle de croissance nécessite, au pas de temps journalier, le taux de germination pour chaque espèce pour calculer dynamiquement la couverture herbacée du sol ;
- l'interaction entre la fonction de simulation de la croissance et celles d'évapo-transpiration : l'évapo-transpiration est calculée en fonction du LAI de la vigne mais également en fonction du LAI des adventices calculé par la fonction de simulation de la croissance ($LAI = \sum LARw$ avec LAR le Leaf Area Ratio de chaque espèce et w le poids sec total de cette espèce) ;
- l'interaction entre la fonction de simulation du partage infiltration/ruissellement et la fonction de simulation du drainage gravitaire : la quantité d'eau drainée dépend de la quantité d'eau infiltrée, d'où le lien entre ces deux fonctions.

D'autres interactions plus complexes entre les fonctions existent via deux variables : l'infiltrabilité de la surface du sol et la teneur en eau du sol. Ces interactions sont représentées par des *flèches colorées* : *jaunes pour l'infiltrabilité et bleues pour la teneur en eau*.

- En ce qui concerne l'infiltrabilité, la modélisation de sa dynamique est exposée au chapitre 7 : on intègre les modélisations des états de surface du sol issues des fonctions *Soil crusting* et *Weeds growth* pour définir et mettre à jour au pas de temps journalier

l'infiltrabilité. De plus, cette variable est logiquement exploitée par la fonction de simulation du partage ruissellement/infiltration.

- La teneur en eau du sol est initialisée par la fonction de caractérisation des propriétés du sol : *Soil distri properties* pour chaque couche de sol définie. Elle est ensuite utilisée et remise à jour pour chaque couche de sol par les fonctions qui simulent les processus d'évapo-transpiration et de drainage gravitaire. Finalement, la teneur en eau de la surface du sol (couche de surface) est exploitée par la fonction de simulation de la germination des adventices (modélisée avec le modèle de temps hydrothermal) qui s'appuie sur le potentiel hydrique et la température du sol pour déterminer le taux de germination (chapitre 6).

En conclusion, beaucoup des interactions entre processus dans le modèle couplé sont des interactions simples de type « fourniture de variables climatiques » ou sont internes aux trois grand pôles décisionnel et biophysiques (hydrologiques et évolution des états de surface du sol). Mais le couplage des modèles a permis de définir des relations entre pôles jusqu'ici inexistantes qui contribuent ainsi à améliorer la représentation intégrée de l'agro-écosystème. Il s'agit en particulier de :

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

9.4 Discussion et conclusion

Le couplage des modèles thématiques unitaires dans le cadre de la construction d'un modèle couplé pression-impact nécessite de répondre à des questions d'ordre conceptuel et technique principalement liées aux différentes échelles spatiales et temporelles des modèles. Ces enjeux interviennent fortement dans le cadre du couplage d'un modèle décisionnel avec un modèle hydrologique. En effet, un tel couplage nécessite de rendre compatible des représentations différentes du milieu physique (unités culturelles et unités hydrologiques) et des dynamiques de processus (pas de temps de la décision et des processus hydrologiques).

D'un point de vue temporel le couplage réalisé en décalant les simulations décisionnelle et biophysique propose une représentation adaptée des dynamiques de chaque type de processus. Cependant, le décalage a nécessité de fixer des moments d'échange d'informations. Ils sont rythmés par le pas de temps de la décision et donc de la prise d'informations biophysiques par les agriculteurs. Actuellement le pas de temps par défaut est la journée mais d'autres moments d'échanges d'informations peuvent être provoqués à l'initiative du modèle de décision DHIVINE si nécessaire. Il pourrait être envisagé de passer à un pas de temps de la demi-journée si la simulation d'une prise d'information quotidienne le matin s'avère insuffisante. Cependant le pas de temps des échanges ne doit pas être plus fréquent car (i) une partie des données biophysiques qui servent d'indicateurs à la décision n'évoluent pas au cours d'intervalle de temps inférieur (e.g. la couverture herbacée) mais surtout car (ii) dans la réalité, les agriculteurs

n'ont pas une connaissance exhaustive et précise des indicateurs simulés à tout moment et pour toutes les parcelles.

Au sein de chaque modèle les états des parcelles évoluent selon les pas de temps des processus mais en décalant les simulations décisionnelle et biophysiques et en définissant un moment et un cadre pour l'échange d'informations, il a fallu également définir une convention pour dater les informations. Ainsi nous avons fait le choix de dater les actions culturales avec leur date de fin (année, mois, jour, heure). Ceci implique que, pour une parcelle donnée, si une action se déroule à cheval sur deux jours, son effet ne sera pris en compte par le modèle hydrologique que le second jour. Dans le cas d'un travail du sol par exemple, si une parcelle est travaillée à moitié et qu'intervient un évènement pluvieux, l'infiltrabilité du sol simulée sera celle d'avant le travail du sol (ce dernier n'étant pas terminé, il n'existe pas encore dans la simulation). De plus, si un nouvel évènement pluvieux survient après que le travail du sol ait été terminé et donc simulé, on simulera une infiltrabilité du sol maximale pour la surface travaillée alors qu'en réalité elle pourrait avoir été réduite sur la moitié de la surface par l'évènement pluvieux précédent. Cette simplification a été choisie car on a considéré que les erreurs telles que celles décrites précédemment étaient peu fréquentes, concernaient des surfaces réduites et se compensaient en partie (dans l'exemple, on sous-estime l'infiltrabilité du sol lors du premier évènement et on la sur-estime lors du second).

Un dernier point concernant la dynamique du couplage porte sur la durée de simulation. Actuellement, la version du modèle couplé ne permet que des simulations annuelles mais ceci ne tient pas aux choix réalisés pour le couplage. Les modèles thématiques unitaires sont à l'origine de cette limite. Plus particulièrement, les modèles limitants sont le modèle décisionnel DHIVINE (la description du parcellaire est effectuée pour une seule année alors qu'il peut évoluer d'une année à l'autre : plantation, arrachage, vente, etc.) et les modèles biophysiques simulant le développement de la couverture herbacée (par rapport à leur initialisation et aux hypothèses sur la dormance, cf chapitre 6). Il serait donc possible de réaliser des simulations pluri-annuelles en adaptant ces modèles unitaires.

D'un point de vue spatial, le couplage a nécessité des adaptations du modèle hydrologique pour intégrer les échelles spatiales de la décision. En effet, l'infiltrabilité du sol comme la concentration en pesticides au sol dépendent d'actions culturales réalisées à l'échelle de la rangée. En retour, les actions dépendent d'indicateurs de la rangée (couverture herbacée, teneur en eau de la surface du sol). Il a donc fallu adapter la modélisation biophysique à cette échelle, ce qui a été réalisé via l'utilisation de vecteurs. Pour chaque variable d'état, chaque unité hydrologique s'est vu attribuer un vecteur de valeurs d'une longueur égale au nombre de type de rangées de la parcelle culturale à l'intérieur de laquelle l'unité hydrologique est incluse. Cette solution permet de fournir des valeurs différentes en fonction des rangées pour les variables indicatrices de la décision. Cependant, elle pose la question de la réaggrégation des valeurs dans le cadre interne de la modélisation biophysique. Un changement d'échelle de la rangée à l'unité hydrologique doit donc être réalisé aussi bien pour la modélisation des flux horizontaux (ruissellement de l'eau et des pesticides) mais également pour certains flux verticaux (évaporation et transpiration). En effet, jusqu'à présent, le modèle de transpiration considérait un LAI unique et seulement dépendant de la vigne pour toute la surface de l'unité hydrologique. En intégrant l'échelle spatiale de la rangée et une représentation de la couverture herbacée, on a eu la possibilité de distinguer un LAI pour la vigne et un pour l'herbe et de connaître la surface de sol concernée par chacun. Dans le modèle couplé, la transpiration dépend donc d'un LAI correspondant à une moyenne pondérée par la surface des LAI de la vigne et de l'herbe. Une meilleure représentation de ces processus pourrait être réalisée

en considérant séparément les processus de transpiration de la vigne et ceux de l'herbe (le volume de sol accessible et le rayonnement absorbé par ces deux types de plantes étant différents).

Un tel couplage entre un modèle de décision et un modèle hydrologique a également posé des questions de compatibilité de périmètre spatial de modélisation. D'un côté le modèle de décision DHIVINE se base sur un périmètre défini par le territoire d'exploitation, de l'autre le modèle hydrologique MHYDAS simule des flux sur un bassin versant. En choisissant l'un ou l'autre des périmètres on doit simplifier l'une des modélisations sur une partie de la surface du périmètre d'étude voire la supprimer. Par conséquent, quel que soit le choix, on augmente le risque d'erreurs du modèle couplé. Cette situation est d'autant plus problématique que le bassin versant étudié est petit. En effet, les parcelles des exploitations étant peu regroupées dans la zone d'étude, les exploitations cultivant au moins une parcelle sur une zone de taille réduite, ont une forte probabilité d'avoir la majorité de leur parcelles situées en dehors de cette zone. La part de la surface cultivée par les exploitations présentes sur le bassin versant et située en dehors du bassin se réduit quand on agrandit la taille du bassin versant notamment si le périmètre du bassin versant s'aligne sur les frontières des communes.

En conclusion, le couplage des modèles thématiques unitaires a permis de représenter les interactions entre les grands pôles de la modélisation : décisionnel, hydrologique et biophysique. Cependant, cette étape de couplage a montré que pour rendre compatible les échelles spatiales et temporelles des processus de type biophysique et de type décisionnel il a été nécessaire d'adopter certaines simplifications qui peuvent augmenter l'incertitude voire l'erreur du modèle couplé.

Remerciements

Un grand merci à Simon Lalauze, Jean-Pierre Rellier, Jean-Christophe Fabre et Xavier Louchart pour avoir rendu possible le couplage informatique des modèles.

Bibliographie

- Argent, R. (2004). An overview of model integration for environmental application - components, frameworks and semantics. *Environmental Modelling & Software*, 19(3) :219–234.
- Argent, R., Perraud, J., Rahman, J., Grayson, R., and Podger, G. (2009). A new approach to water quality modelling and environmental decision support systems. *Environmental Modelling & Software*, 24(7) :809–818.
- Gumiere, S., Bissonnais, Y. L., and Raclot, D. (2009). Soil resistance to interrill erosion : Model parameterization and sensitivity. *Catena*, 77(3) :274–284.
- Kralisch, S., Krause, P., and David, O. (2005). Using the object modeling system for hydrological model development and application. *Advances in Geosciences*, 4 :75–81.
- Lagacherie, P., Rabotin, M., Colin, F., Moussa, R., and Voltz, M. (2010). Geo-MHYDAS : a landscape discretization tool for distributed hydrological modeling of cultivated areas. *Computers & Geosciences*, 36(8) :1021–1032.
- Maxwell, T. and Costanza, R. (1997). A language for modular spatio-temporal simulation. *Ecological Modelling*, 103(2-3) :105–113.
- Moore, R. and Tindall, C. (2005). An overview of the open modelling interface and environment (the OpenMI). *Environmental Science & Policy*, 8(3) :279–286.
- Moussa, R., Voltz, M., and Andrieux, P. (2002). Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood events. *Hydrological Processes*, 16(2).
- Zanchi, C. and Torri, D. (1980). Evaluation of rainfall energy in central italy. In *Assessment of Erosion*, pages 133–142. De Boedt, M., Gabriels, D. (Eds.), Toronto, wiley edition.

Chapitre 10

Application du modèle couplé à un cas réel

Sommaire

10.1 Introduction	255
10.2 Matériel et Méthodes	255
10.2.1 La zone et la période d'étude	255
10.2.2 Les exploitations agricoles et leurs conduites techniques	257
10.2.3 La paramétrisation du modèle couplé	261
10.2.3.1 La paramétrisation de DHIVINE	261
10.2.3.2 La paramétrisation des modèles biophysiques	264
10.2.3.3 La simplification de certaines interactions entre modèles	264
10.2.4 Démarche	265
10.3 Résultats et discussion	267
10.3.1 Les calendriers culturaux à l'échelle de l'exploitation	267
10.3.2 Les itinéraires techniques simulés sur les parcelles	269
10.3.2.1 La parcelle MG16_02 (tableau 10.2)	269
10.3.2.2 La parcelle NP13_01 (tableau 10.3)	271
10.3.2.3 La parcelle NP06_03 (tableau 10.4)	272
10.3.2.4 Synthèse	272
10.3.3 Les dynamiques simulées de l'infiltrabilité du sol à l'échelle de la rangée	273
10.3.3.1 La parcelle MG16_02 (figure 10.7)	273
10.3.3.2 La parcelle NP13_01 (figure 10.8)	277
10.3.3.3 La parcelle NP06_03 (figure 10.9)	279
10.3.3.4 Synthèse	279
10.3.4 Discussion sur l'effet d'une simplification opérée dans l'application du modèle	280
10.3.5 Les futurs besoins de validation du modèle couplé	281
10.4 Conclusion	282

Chapitre 10

Application du modèle couplé à un cas réel

10.1 Introduction

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

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

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

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

10.2 Matériel et Méthodes

10.2.1 La zone et la période d'étude

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

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

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

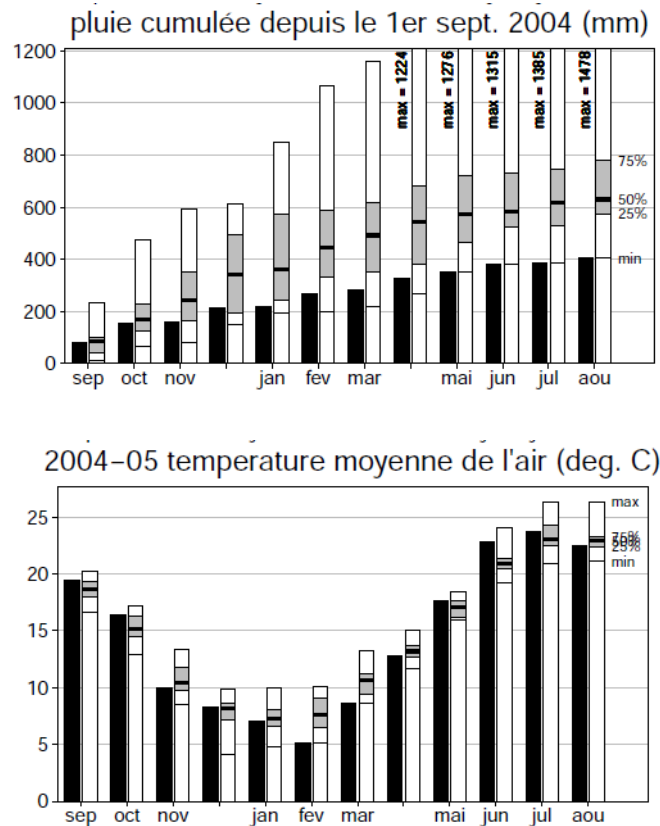


FIGURE 10.1 – Climat de l'année culturale 2004-2005 (pluviométrie cumulée et température moyenne)

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

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

10.2.2 Les exploitations agricoles et leurs conduites techniques

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

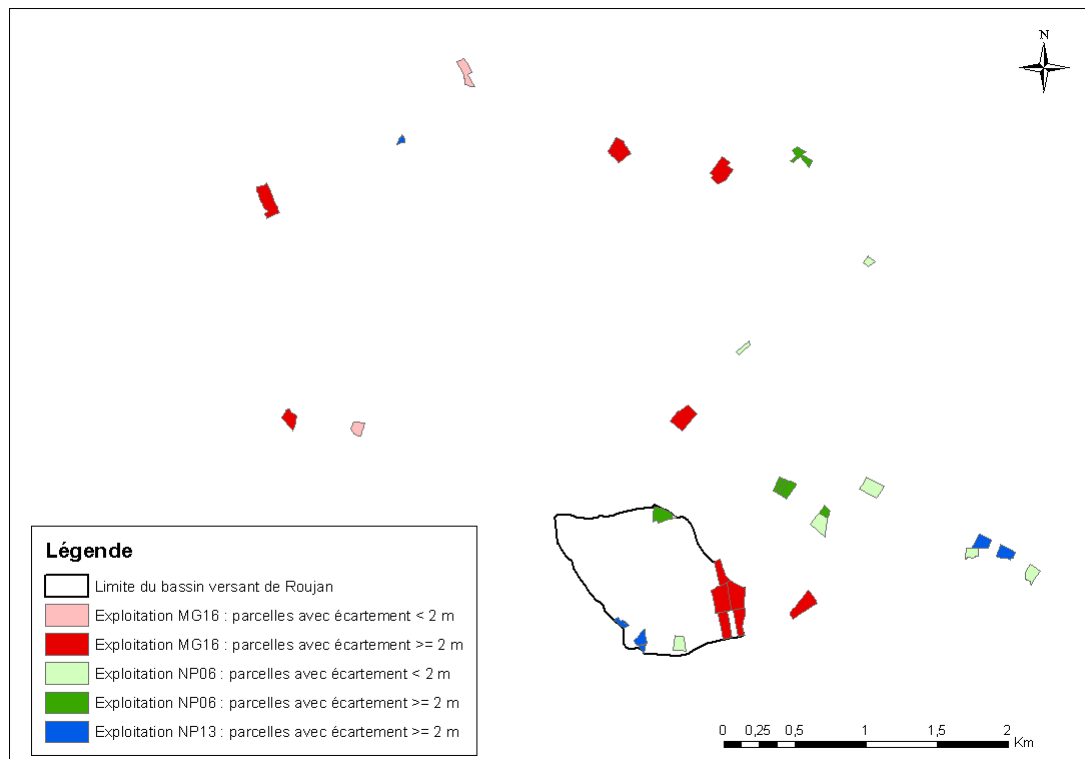


FIGURE 10.2 – Parcellaires en vigne des trois exploitations agricoles étudiées

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

10.2.3 La paramétrisation du modèle couplé

10.2.3.1 La paramétrisation de DHIVINE

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

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

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

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

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

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

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

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

Pour l'exploitation MG16 :

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

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

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

Pour l'exploitation NP13 :

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

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

Pour l'exploitation NP06 :

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

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

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

10.2.3.2 La paramétrisation des modèles biophysiques

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

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

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

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

10.2.3.3 La simplification de certaines interactions entre modèles

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

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

10.2.4 Démarche

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

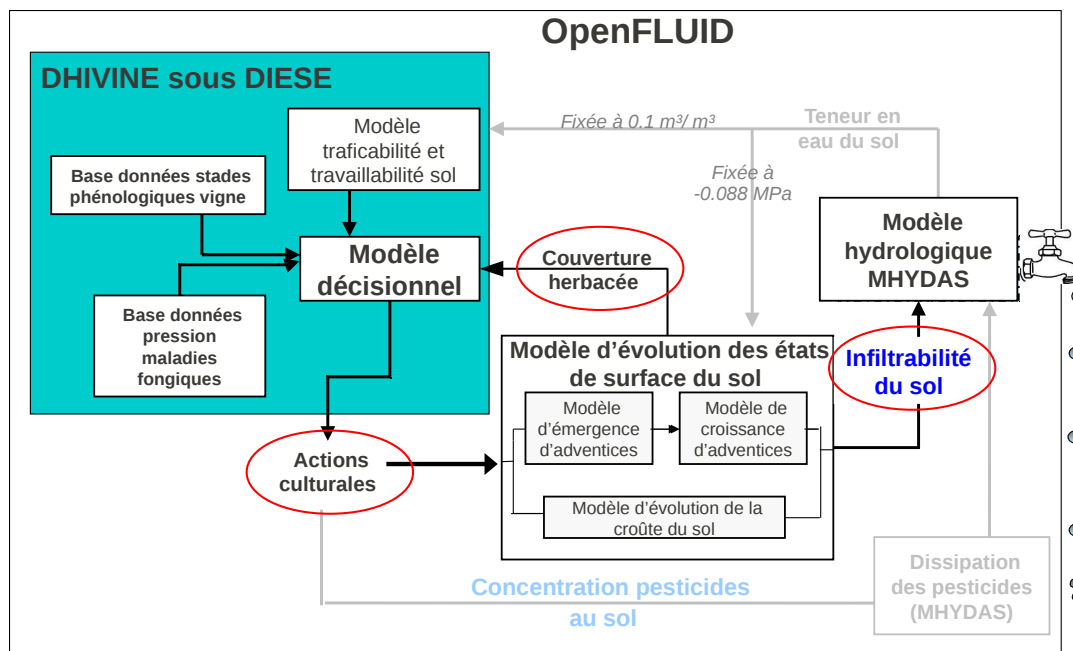


FIGURE 10.3 – Schéma conceptuel du modèle couplé mis en oeuvre pour l'application au cas réel

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

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

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

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

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

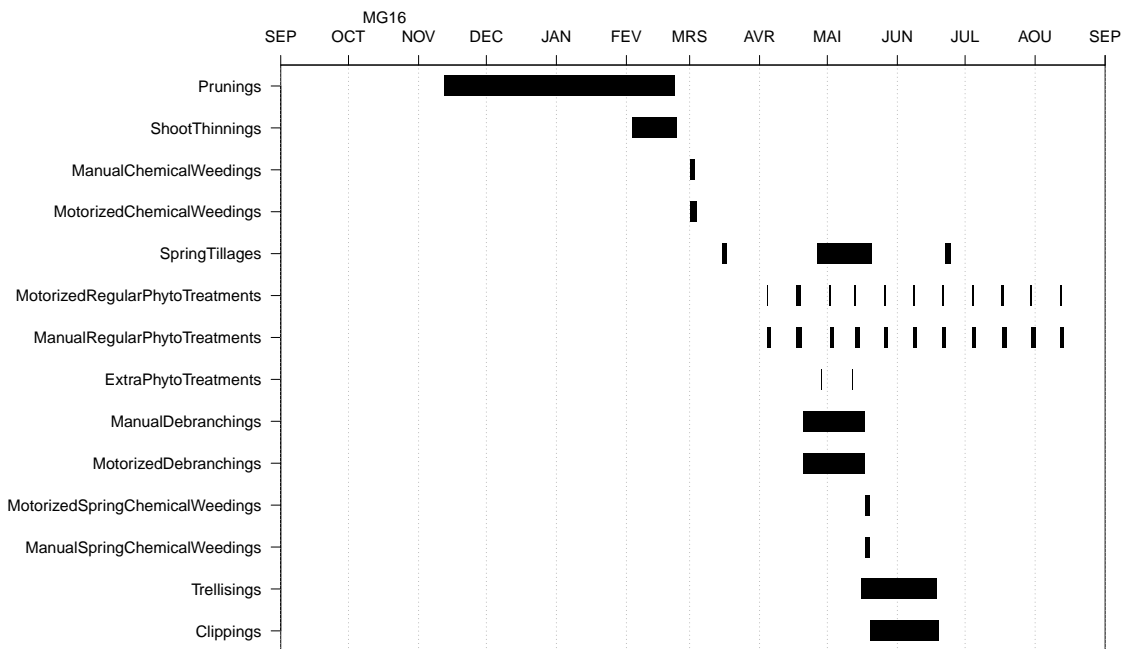


FIGURE 10.4 – Calendrier cultural simulé de l'exploitation viticole MG16 pour l'année culturale 2004-2005

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

10.3 Résultats et discussion

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

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

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

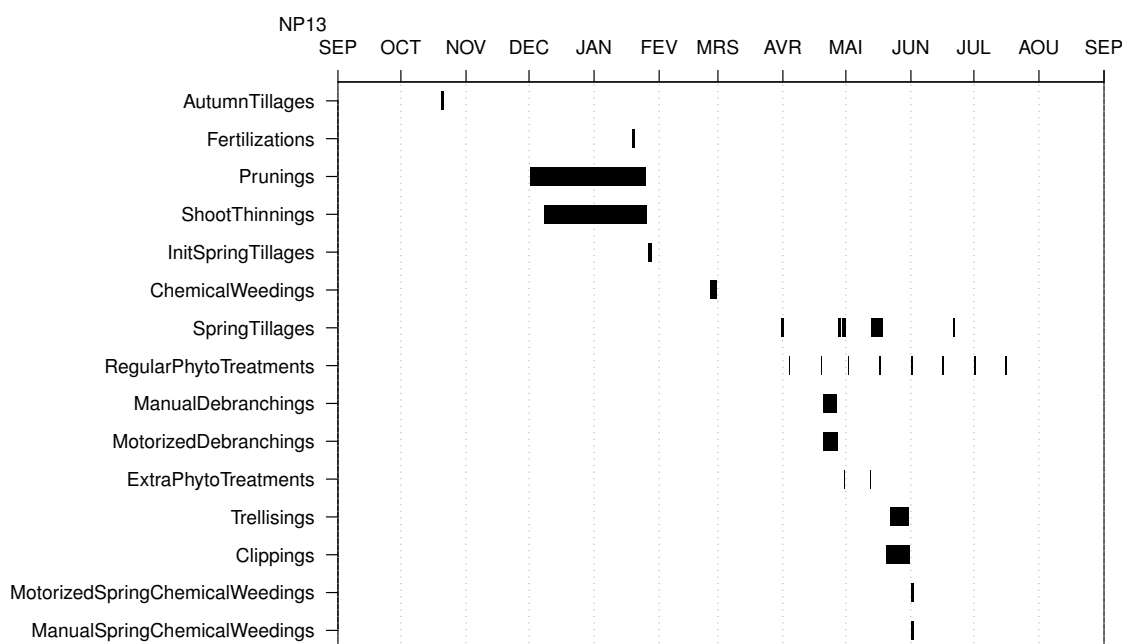


FIGURE 10.5 – Calendrier cultural simulé de l'exploitation viticole NP13 pour l'année culturale 2004-2005

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

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

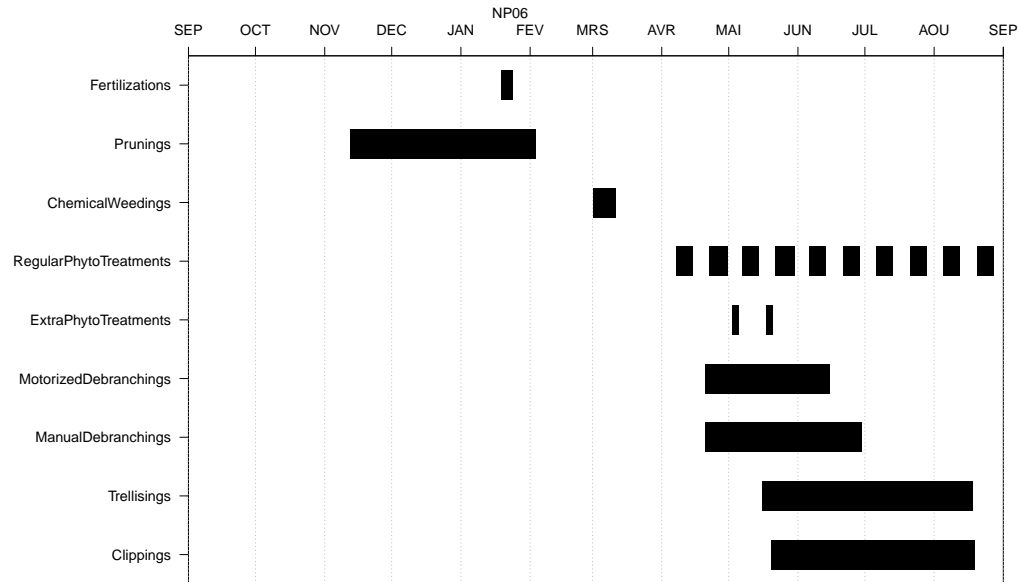


FIGURE 10.6 – Calendrier cultural simulé de l'exploitation viticole NP06 pour l'année culturale 2004-2005

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

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

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

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

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

10.3.2 Les itinéraires techniques simulés sur les parcelles

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

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

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

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

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

10.3.2.1 La parcelle MG16_02 (tableau 10.2)

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

TABLE 10.2 – Itinéraire technique simulé sur la parcelle MG16_02

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

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

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

10.3.2.2 La parcelle NP13_01 (tableau 10.3)

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

TABLE 10.3 – Itinéraire technique simulé sur la parcelle NP13_01

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

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

10.3.2.3 La parcelle NP06_03 (tableau 10.4)

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

TABLE 10.4 – Itinéraire technique simulé sur la parcelle NP06_03

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

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

10.3.2.4 Synthèse

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

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

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

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

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

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

10.3.3.1 La parcelle MG16_02 (figure 10.7)

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

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

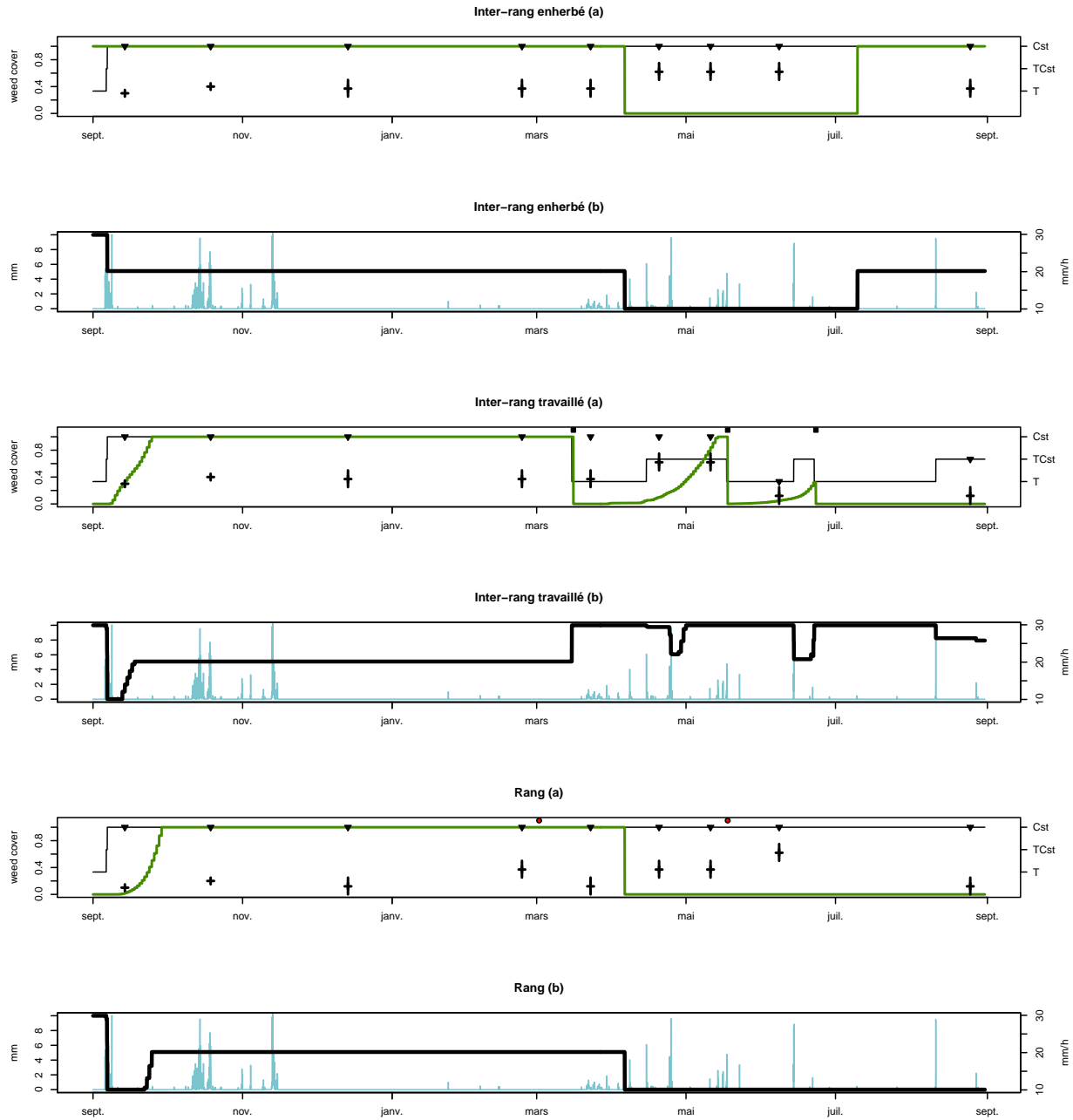


FIGURE 10.7 – Evolution de la couverture herbacée (courbe verte), des états de surface sur sols nus (courbe noire) et de l'infiltrabilité (courbe noire grasse) modélisée pour les trois types de rangées de la parcelle MG16_02

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

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

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

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

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

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

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

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

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

En conclusion pour la parcelle MG16_02 :

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

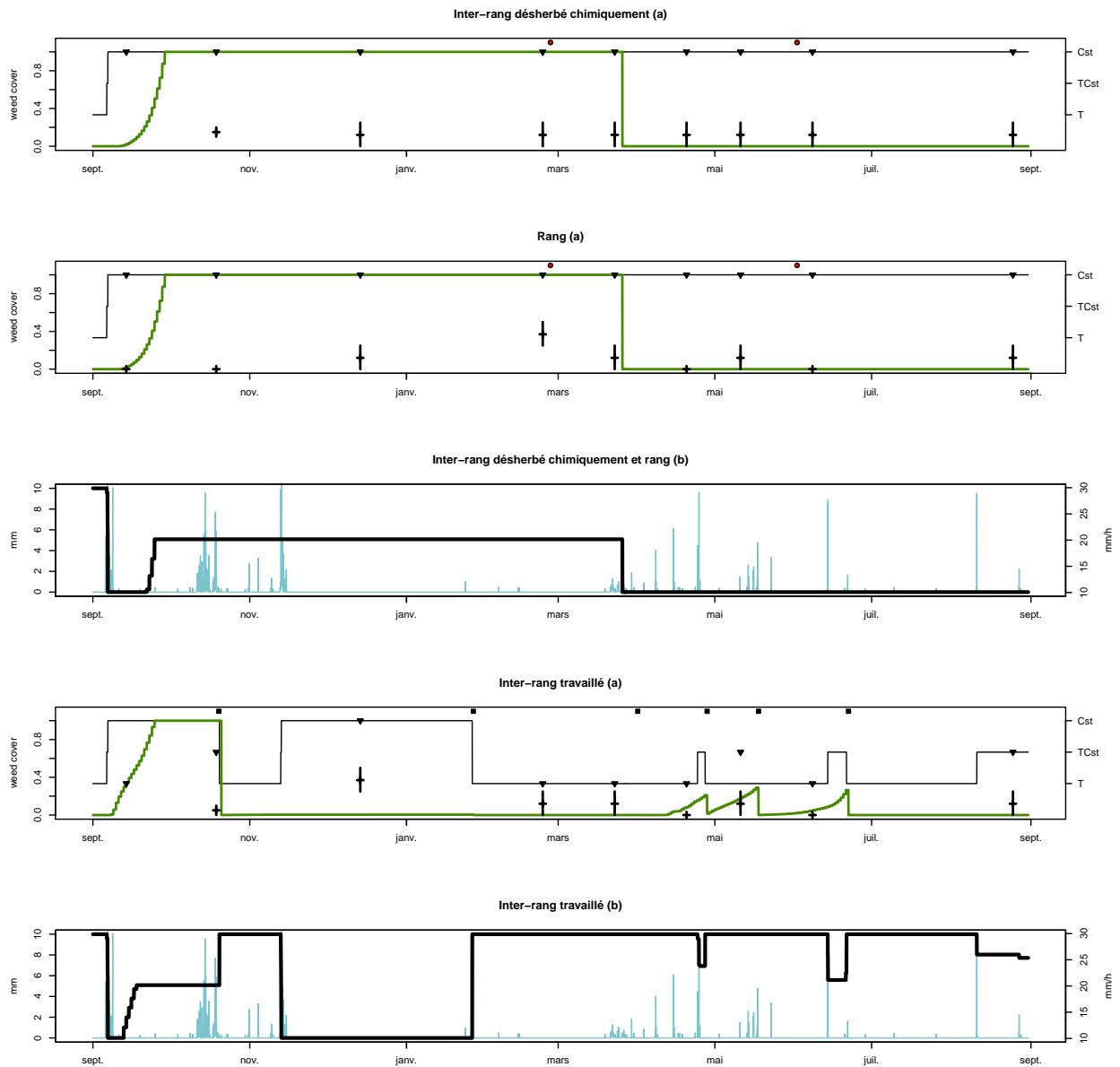


FIGURE 10.8 – Evolution de la couverture herbacée (courbe verte), des états de surface sur sols nus (courbe noire) et de l'infiltrabilité (courbe noire grasse) modélisée pour les trois types de rangées de la parcelle NP13_01

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

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

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

10.3.3.2 La parcelle NP13_01 (figure 10.8)

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

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

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

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

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

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

En conclusion pour la parcelle NP13_01 :

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

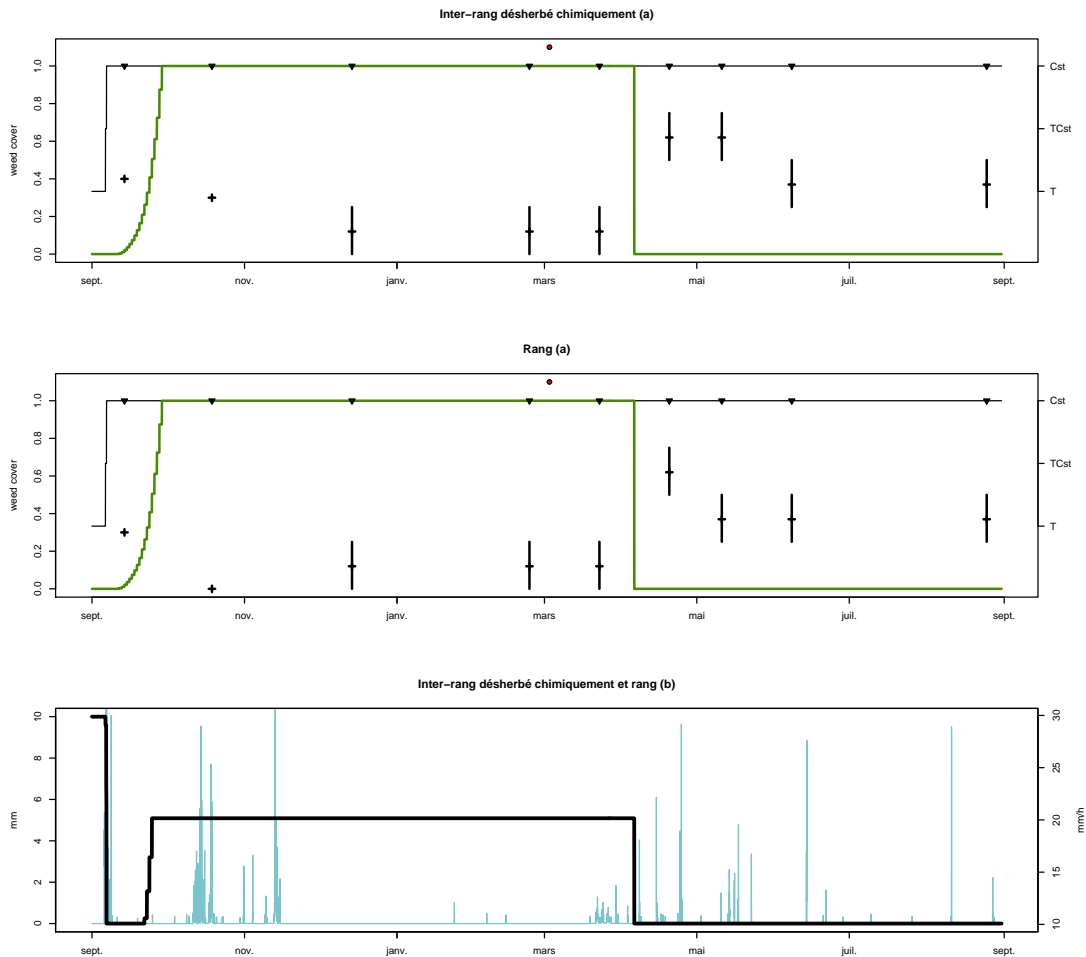


FIGURE 10.9 – Evolution de la couverture herbacée (courbe verte), des états de surface sur sols nus (courbe noire grasse) et de l'infiltrabilité (courbe noire fine) modélisée pour les deux types de rangées de la parcelle NP06_03

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

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

10.3.3.3 La parcelle NP06_03 (figure 10.9)

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

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

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

10.3.3.4 Synthèse

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

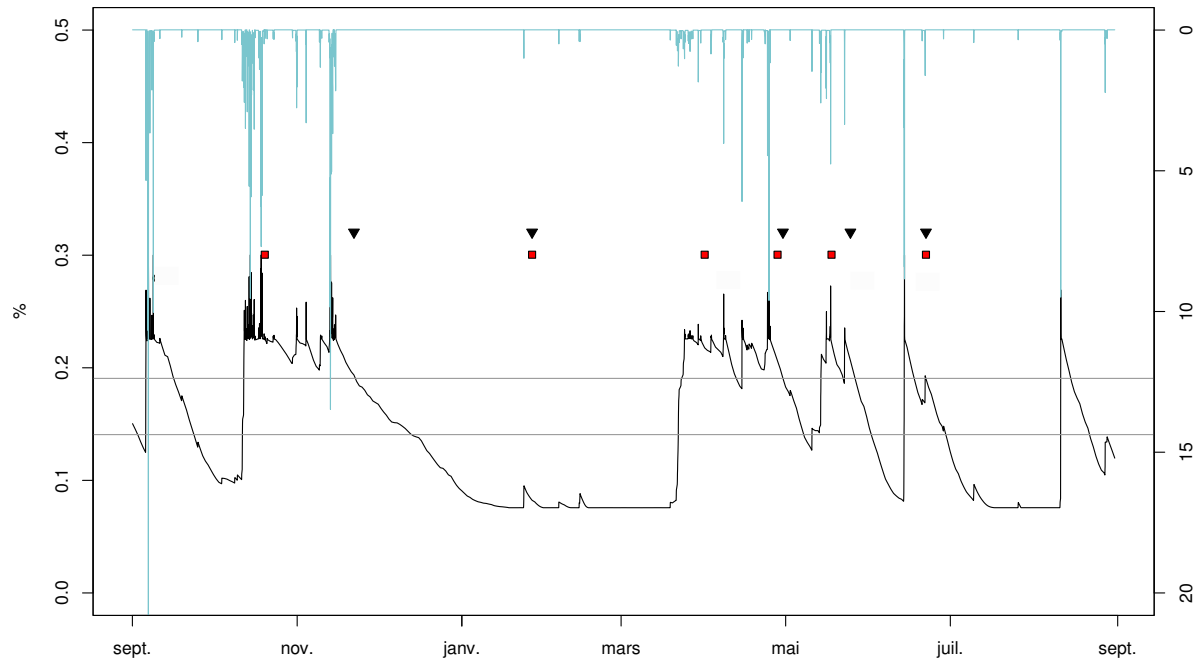


FIGURE 10.10 – Dynamique de l’humidité volumique de la surface du sol (%) de la rangée entretenue par travail du sol de la parcelle NP13_01, dates de travail du sol simulées et pluviométrie (mm).

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

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

10.3.5 Les futurs besoins de validation du modèle couplé

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

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

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

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

10.4 Conclusion

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

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

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

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

Remerciements

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

Bibliographie

- Andrieux, P., Hatier, A., Asseline, J., de Noni, G., and Voltz, M. (2001). Predicting infiltration rates by classifying soil surface features in a mediterranean wine-growing area. In *International symposium on the significance of soil surface characteristics in soil erosion, COST 623 « Soil erosion and global change » workshop*, Strasbourg, France.
- Genuchten, M. V. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44 :892–898.
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12 :513–522.
- Sargent, R. (1991). Simulation model verification and validation. In *Proceedings of the 1991 Winter Simulation Conference*, pages 37–47.
- Voltz, M. and Albergel, J. (2002). OMERE : observatoire méditerranéen de l’Environnement rural et de l’Eau. impact des actions anthropiques sur les transferts de masse dans les hydrosystèmes méditerranéens ruraux. proposition d’Observatoire de Recherches en environnement.

Conclusion générale et perspectives

Sommaire

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

Conclusion générale et perspectives

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

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

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

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

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

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

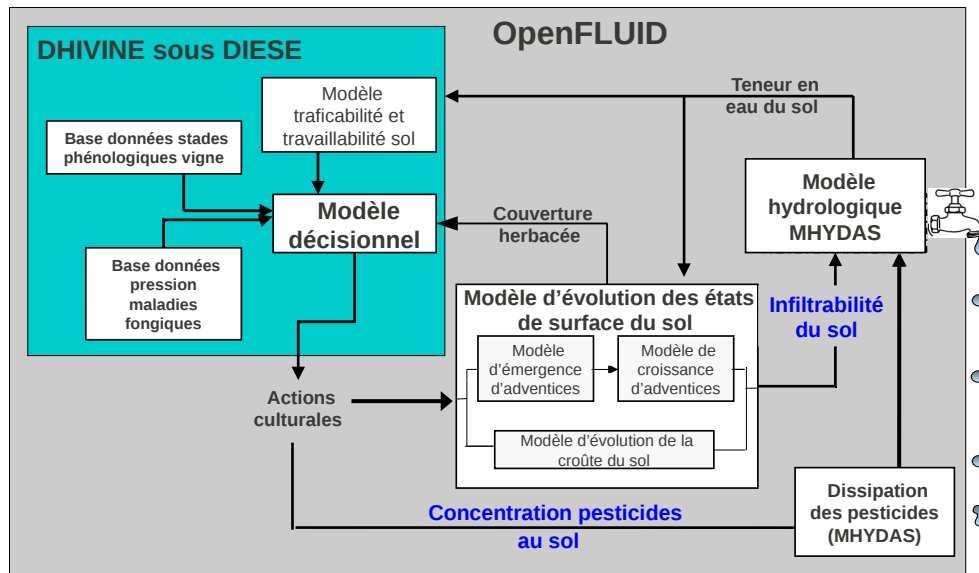


FIGURE 10.11 – Schéma du modèle conceptuel appliqué au cas d'étude

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

11.1 Les principaux résultats

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Les résultats obtenus montrent que l'approche déterministe précise de modélisation des conduites techniques choisie pour la modélisation décisionnelle permet d'obtenir des représentations réalistes des itinéraires techniques aussi bien à l'échelle de l'exploitation qu'à l'échelle de la parcelle même si certaines erreurs dans le modèle restent à corriger. Par ailleurs, à l'échelle de la rangée de la parcelle culturale, on a pu voir que la dynamique simulée des états de surface du sol et donc de l'infiltrabilité du sol est largement dépendante de l'ensemble de la chaîne de modélisation qui la produit. En effet, elle est fortement liée aux calendriers des actions culturales eux-mêmes modifiés par le biais d'interactions avec des processus biophysiques comme la croissance de l'herbe ou l'évolution de la teneur en eau du sol. Sa bonne représentation globale est donc liée à la qualité des résultats des modèles en amont.

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

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

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

11.2 Les perspectives

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

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

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

Table des figures

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

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

9.4	Diagramme du modèle couplé DHIVINE-MHYDAS	244
10.1	Climat de l'année culturale 2004-2005 (pluviométrie cumulée et température moyenne)	256
10.2	Parcellaires en vigne des trois exploitations agricoles étudiées	257
10.3	Schéma conceptuel du modèle couplé mis en oeuvre pour l'application au cas réel	265
10.4	Calendrier cultural simulé de l'exploitation viticole MG16 pour l'année culturale 2004-2005	266
10.5	Calendrier cultural simulé de l'exploitation viticole NP13 pour l'année culturale 2004-2005	267
10.6	Calendrier cultural simulé de l'exploitation viticole NP06 pour l'année culturale 2004-2005	268
10.7	Evolution de la couverture herbacée (courbe verte), des états de surface sur sols nus (courbe noire) et de l'infiltrabilité (courbe noire grasse) modélisée pour les trois types de rangées de la parcelle MG16_02	274
10.8	Evolution de la couverture herbacée (courbe verte), des états de surface sur sols nus (courbe noire) et de l'infiltrabilité (courbe noire grasse) modélisée pour les trois types de rangées de la parcelle NP13_01	276
10.9	Evolution de la couverture herbacée (courbe verte), des états de surface sur sols nus (courbe noire) et de l'infiltrabilité (courbe noire grasse) modélisée pour les deux types de rangées de la parcelle NP06_03	278
10.10	Dynamique de l'humidité volumique de la surface du sol (%) de la rangée entretenue par travail du sol de la parcelle NP13_01, dates de travail du sol simulées et pluviométrie (mm).	281
10.11	Schéma du modèle conceptuel appliqué au cas d'étude	288

Liste des tableaux

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

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

RÉSUMÉ

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

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

ABSTRACT

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

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