



PROGRAMME



SP3A : SPATIALISATION DE PRATIQUES AGRICOLES ADAPTEES ET ACCEPTABLES

Préservation des sols viticoles méditerranéens
et amélioration de leurs fonctions de régulation des flux d'eau et de matières associées :
répartition spatiale dans un bassin versant, de pratiques agricoles adaptées et acceptables

SP3A : SPATIALIZATION OF APPROPRIATE AND ACCEPTABLE AGRICULTURAL PRACTICES

Preservation of Mediterranean vineyard soils
and improving their regulatory functions of water flows and associated matters: spatial
distribution of appropriate and acceptable farming practices in a catchment

Coordinateurs du projet :

Patrick Andrieux et Anne Biarnès

INRA – IRD / UMR Lisah, 2 Place Viala, 34060 Montpellier

patrick.andrieux@antilles.inra.fr

anne.biarnes@supagro.inra.fr

Rédacteurs du rapport :

P. Andrieux, A. Biarnes, J.M. Barbier, A. Bonnefoy, C. Compagnone,
X. Delpuech, C. Gary, A. Metay, J.-P. Rellier et M. Voltz

Rapport final

15 janvier 2015

Remerciements :

Nos remerciements s'adressent aux membres du comité scientifique GESSOL et en particulier à Claire Chenu sa Présidente (AgroParisTech, UMR BIOEMCO) ainsi qu'aux membres du comité d'orientation de GESSOL.

Nous remercions également les gestionnaires du programme GESSOL et les agents du MEDDTL et de l'ADEME associés à GESSOL, notamment Camille Guellier (ADEME), Antoine Bispo (ADEME) et Jurgis Sapjanskas (MEDDTL).

Résumé

Le maintien ou la restauration de la fonction de régulation des flux d'eau et de pesticides sont des enjeux particulièrement importants en région viticole méditerranéenne du fait des risques élevés de contamination des eaux par ruissellements polluants. Cette fonction, liée à un coefficient d'infiltrabilité du sol élevé, assure au sol un rôle de tampon par rapport aux crues, à l'érosion et, potentiellement, au transfert de pesticides. Maintenir ou restaurer la fonction de régulation du sol dans un bassin versant viticole revient à identifier des pratiques d'entretien du sol et des distributions spatiales de ces pratiques qui participent à la préservation ou restauration de l'infiltrabilité tout au long de l'année. Ces pratiques doivent par ailleurs être potentiellement acceptables par les viticulteurs. Identifier ces pratiques et leurs répartitions nécessite d'être en mesure d'évaluer leurs bénéfices et leurs coûts, c'est à dire : (1) les effets des pratiques et de leur répartition spatiale sur la fonction du sol à préserver et (2) les contraintes de mise en œuvre de ces pratiques. Sur ces deux points, les connaissances et les outils de modélisation sont encore insuffisants pour réaliser ces évaluations aux échelles spatiales et temporelles pertinentes.

L'objectif du projet est d'identifier et d'évaluer, en viticulture méridionale, les modalités d'entretien du sol et les répartitions spatiales de ces modalités permettant de réduire, à l'échelle du bassin versant, la contamination des eaux de ruissellement par les herbicides, tout en étant économiquement, techniquement et socialement acceptables par les viticulteurs.

La démarche repose sur l'identification à dire d'experts de stratégies de réduction de l'usage des herbicides, dites « stratégies candidates », à l'échelle du bassin versant. Ces stratégies définissent (i) des cibles à atteindre en termes d'intensité d'utilisation d'herbicide aux échelles de la parcelle et du bassin versant, (ii) des modalités d'entretien du sol permettant l'atteinte de ces cibles, tout en réduisant les risques de ruissellement et (iii) des règles de répartition des modalités entre les différentes parcelles en vigne du bassin versant.

Les stratégies ont été ensuite soumises à une double évaluation. Une première évaluation des performances environnementales et productives permises par la mise en œuvre de ces stratégies, a été effectuée aux échelles du bassin versant et/ou de la parcelle. Ces évaluations ont été réalisées à l'aide d'une chaîne de modèles, dont certains ont été développés au cours du projet, originale. Une seconde évaluation des possibilités de changement de pratique à partir d'enquêtes auprès des agriculteurs a ensuite été effectuée. Cette deuxième évaluation a été réalisée sur la base d'entretiens auprès d'un échantillon de viticulteurs du bassin versant.

Les résultats de chacune de ces évaluations ont été comparés pour établir un bilan des impacts environnementaux et productifs des stratégies proposées. Ils doivent également fournir des pistes de choix de nouvelles stratégies mieux adaptées aux contraintes des viticulteurs. L'analyse à dire de viticulteurs et les résultats des évaluations par modèles convergent vers la question de l'introduction de plus de flexibilité dans la définition des stratégies de réduction des usages d'herbicide et des modalités d'entretien du sol associées.

Viticulture, Bassin versant, Etats de surface du sol, Pratiques d'entretien du sol, Enherbement, Ressources hydriques et azotées, Modélisation, Rendement viticole, Caractérisation socio-technique.

Abstract

Maintaining and restoring the regulation function of water and pesticides fluxes are particularly important issues in Mediterranean wine growing area because of the high risk of water contamination by runoff pollutants. Due to a high soil infiltration rate, this function provides a buffer against floods, erosion and potential pesticides transfers. Maintaining or restoring the function of regulation of the soil in a vineyard catchment involves the identification of soil management practices and their spatial distributions that contribute to the preservation or restoration of soil infiltration properties throughout the year. These practices should also be potentially acceptable for growers. Identifying these practices and their distribution implies to be able to assess their benefits and costs, ie: (1) the effects of those practices and of their spatial distribution on the soil's function to be preserved and (2) the constraints of implementation of these practices. Regarding these two points, the knowledge and modelling tools are still insufficient to achieve these assessments to the relevant spatial and temporal scales.

The objective of the project is to identify and evaluate in Mediterranean viticulture, soil management practices and spatial distributions of these practices that enable reduction the contamination of runoff waters by herbicides at the catchment scale. Those practices should be economically, technically and socially acceptable by growers.

The approach is based on the identification by experts of strategies, so called "candidate strategies", to reduce the use of herbicides across the catchment. These strategies define (i) targets in terms of herbicide use intensity at the plot and catchment scales, (ii) soil management practices to achieve these targets, while reducing the risk of runoff and (iii) distribution rules of those practices between different vineyard plots in the catchment.

Those strategies were then subjected to a double evaluation. A first assessment of the environmental and production performances after implementation of these strategies was conducted at the catchment and/or plot scales. These evaluations were carried out using an original chain of models, some of which were developed during the project. A second assessment of the possibilities of changes of practices by the farmers was then conducted. The second evaluation was conducted based on interviews of a sample of farmers in the catchment.

The results of each of these assessments were compared to establish a balance of environmental and productive impacts of proposed strategies and provide avenues to choose new strategies best suited to the constraints of winegrowers. Both assessments converge on the issue of introducing more flexibility in the definition of strategies to reduce herbicide use as well as on the associated modalities of soil management practices associated.

Wine-growing, Catchment, Soil surface characteristics, Soil management practices, Cover cropping, Water and nitrogen resources, Modelling, Grapevine yield, Socio-technical characterization.

Participants au projet

Partenaires scientifiques

N°	Etablissement/département/unité	Membre
1	UMR LISAH (Laboratoire d'étude des interactions Sol -Agrosystème - Hydrosystème INRA (EA) – IRD – Montpellier SupAgro 2 place Viala 34060 Montpellier	Patrick Andrieux Anne Biarnès Marc Voltz Jean-Christophe Fabre David Crevoisier Jean Luc Belotti A. Bonnefoy (CDD) Nakié Paré (CDD)
2	UMR SYSTEM, INRA (EA) – CIRAD (CA) – Montpellier SupAgro 2 place Viala 34060 Montpellier	Christian Gary Aurélie Métaï Sébastien Roux Nicolas Guilpart Doctorant
3	IFV (Institut Français de la Vigne et du vin) Domaine de Donadille 30230 Rodilhan	Xavier Delpuech
4	UMR INNOVATION, INRA (SAD)– CIRAD Montpellier SupAgro 2 place Viala 34060 Montpellier	Jean Marc Barbier
5	Unité BIA (Biométrie et intelligence artificielle) INRA- Chemin de Borde-Rouge-Auzeville - BP 52627 - F-31326 Castanet-Tolosan cedex	Jean Pierre Rellier
6	CEFE (Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive), UMR CNRS – CIRAD- Univ Montpellier I, II et III, Montpellier SupAgro, Campus CNRS - 1919, route de Mende - 34293 Montpellier cedex 5	Elèna Kazakou
7	LISTO (Laboratoire de recherche sur les Innovations Socio-Techniques et Organisationnelles) INRA - 26 bd Dr Petitjean, BP 87 999, 21079 DIJON Cedex	Claude Compagnone Laura Sayre (CDD)

Partenaires non scientifiques

- William Trambouze - Chambre d'Agriculture de l'Hérault – 34120 Pézenas
- Laurent Bouchet - Envilys - Société indépendante de conseil en agri-environnement -
Domaine du Chapitre - 170 boulevard du Chapitre - 34750 Villeneuve-lès-Maguelone

Introduction

Contexte	2
Objectifs, démarche et plan du rapport	6

Partie 1: Identification de stratégies de réduction des risques de ruissellement polluant

1 Méthodes.....	9
2 Résultats	10

Partie 2: Caractérisation et état des lieux d'un bassin versant viticole à enjeux : le bassin versant du Rieutort

Introduction	14
1 Le milieu physique et l'occupation du sol.....	14
2 Caractéristiques socio techniques	28

Partie 3: Construction de modèles pour l'évaluation des stratégies candidates

1 Introduction.....	42
2 Simuler les itinéraires techniques résultants de la mise en œuvre de choix techniques et organisationnels dans une exploitation agricole	43
3 Modélisation des impacts des itinéraires techniques.....	58

Partie 4: Mise en œuvre des évaluations sur le bassin versant du Rieutort

1 Introduction.....	79
2 Évaluation des stratégies normatives par modélisation.....	79
3 Acceptabilité des stratégies candidates.....	127

Partie 5: Synthèse et conclusion générale

1 Les stratégies candidates et leurs déclinaisons en modalités d'entretien du sol spatialement réparties au sein du bassin versant.....	133
2 L'évaluation par modélisation.....	134
3 L'évaluation à dire d'acteurs.....	142
4 Conclusion.....	144

Références bibliographiques	146
Liste des figures et tableaux - Table des matières - Annexes	

Introduction

Contexte

Positionnement général

La réduction des risques d'inondation, de pollution des eaux par les pesticides et d'érosion des sols est un enjeu environnemental important dans les bassins versants cultivés. Elle passe par une meilleure maîtrise des flux d'eau et de matières associées. Dans ce contexte, parallèlement à la réduction des usages de pesticides, le maintien ou la restauration de la fonction du sol de régulation des flux et des matières associées est essentielle. Cette fonction, liée à un coefficient d'infiltrabilité du sol élevé, assure au sol un rôle de tampon par rapport aux crues, à l'érosion et, dans les situations où les processus de pollution sont surtout liés au ruissellement de surface, au transfert de pesticides.

La réduction des usages de pesticides et le maintien ou la restauration de la fonction de régulation des flux d'eau et de pesticides sont ainsi des enjeux particulièrement importants en région viticole méditerranéenne du fait des risques élevés de contamination des eaux par ruissellements polluants (Lennartz *et al.*, 1997 ; Louchart *et al.*, 2001 ; 2007). En effet, la vigne est une culture pérenne à croissance principalement estivale, plantée en rangées sous forme de haies et, de ce fait, couvrant peu le sol. Par ailleurs, la vigne fait partie des cultures les plus fortes consommatrices en pesticides (Aubertot *et al.*, 2005) : en moyenne, 14 traitements sont effectués annuellement, contre les champignons principalement et les insectes ravageurs tandis que l'utilisation d'herbicides, sous les rangées de vigne a minima, est quasi systématique pour contrôler les adventices (Mezière *et al.*, 2009). Au total la vigne consomme 20 % (en masse) des quantités totales des pesticides utilisés en France alors qu'elle ne couvre que 3,7 % de la SAU (Aubertot *et al.*, 2005). Dans le sud de la France, les risques de ruissellement polluant sont particulièrement élevés du fait de l'importance de la surface viticole qui en fait l'un des plus grands vignobles français, des caractéristiques des sols et des caractéristiques du climat méditerranéen (pluies de forte intensité). De fait, selon les données de l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse (RMC), la situation de contamination des eaux est particulièrement préoccupante dans le bassin RMC : en 2002-2003, 70 % des points de mesure montraient une contamination significative et les zones viticoles étaient particulièrement touchées (Agence de l'eau RMC, 2004).

De nombreux travaux ont montré que le coefficient d'infiltrabilité du sol est sous la dépendance des états de surface du sol (Leonard & Andrieux, 1998 ; Cerdan *et al.* 2002 ; Janeau *et al.*, 2003) et qu'en milieu cultivé, ces états de surface et leurs évolutions dépendent des pratiques agricoles en interaction avec le climat (Auzet *et al.*, 1995 ; Souchère *et al.*, 1998 ; Govers *et al.*, 2000 ; Takken *et al.*, 2001). Dans le cas de la viticulture, il est établi que les pratiques impliquées dans ces évolutions sont principalement les pratiques d'entretien du sol, lesquelles résultent de la mise en œuvre de techniques variées (désherbage chimique, travail du sol, enherbement naturel ou semé, permanent ou temporaire) utilisées seules ou combinées au sein d'une même parcelle.

Maintenir ou restaurer la fonction de régulation du sol dans un bassin versant (BV) viticole, dans un objectif de réduction des contaminations, revient à identifier des modalités d'entretien du sol (i.e. des combinaisons de techniques au sein de la parcelle) et des distributions spatiales de ces modalités qui participent à la préservation ou restauration de l'infiltrabilité au long de l'année, tout en permettant de réduire les usages de pesticides. Ces modalités doivent par ailleurs être potentiellement acceptables par les viticulteurs, tant du point de vue technico-économique que socialement. Identifier ces modalités et leurs répartitions nécessite donc d'être en mesure d'évaluer leurs bénéfices et leurs contraintes d'adoption, c'est à dire : (1) les effets de leur mise en œuvre dans le bassin versant sur la fonction du sol à préserver et (2) les contraintes de leur mise en œuvre pour les viticulteurs du bassin. Sur ces deux points, les connaissances et les outils de modélisation sont encore insuffisants pour

réaliser ces évaluations aux échelles spatiales et temporelles pertinentes. Les échelles à considérer vont en effet, d'une part, de la parcelle à l'exploitation agricole et au bassin versant et, d'autre part, de l'événement de pluie aux cycles de production annuels et pluriannuels.

Etats des connaissances et enjeux scientifiques

Evaluation de l'effet des pratiques sur les risques de ruissellement polluant

De nombreux essais ont permis de démontrer que les pratiques d'entretien des sols qui visent à maintenir une couverture du sol la plus complète possible dans le temps et l'espace (mulch ou, enherbement) limitent la dégradation de la structure des sols et réduisent significativement les risques de ruissellement à l'échelle de la parcelle (Litzler, 1988 ; Le Bissonnais et Andrieux, 2007 ; Trambouze et al., 2008). Cependant, ces essais ont également montré qu'il existe une assez forte variabilité de l'effet des différentes pratiques d'entretien des sols sur cette réduction des risques. Ainsi, l'entretien par le travail du sol a l'avantage de générer une porosité et une rugosité de la surface du sol qui favorise, d'une part l'infiltration, et d'autre part la rétention superficielle de l'eau et le ralentissement éventuel du ruissellement. Cependant, l'ampleur de cet effet est variable en fonction des outils utilisés et des conditions de travail, et sa durabilité est également variable selon les caractéristiques des pluies, la stabilité structurale des sols et la fréquence de renouvellement des travaux du sol. Dans le cas de l'enherbement, semé ou spontané, le couvert protège les sols à faible stabilité structurale contre la battance. Il s'oppose à la concentration du ruissellement (division des flux) et augmente l'infiltration, déjà améliorée par le développement racinaire. Mais l'implantation et mise en œuvre d'un enherbement semé (engazonnement) nécessite une bonne technicité (semer et expérience) de la part de l'agriculteur. Par ailleurs, plusieurs expérimentations montrent qu'un certain délai peut être nécessaire pour que cette pratique montre son efficacité maximale (bonne implantation du couvert végétal).

Pour évaluer l'impact des pratiques d'entretien du sol sur le ruissellement à l'échelle de la parcelle, une typologie des états de surface des sols a été définie par Andrieux et al. (2001) et validée pour plusieurs sols cultivés méditerranéens, la plaine viticole héraultaise dans le cadre d'un programme Gessol antérieur (Lagacherie et al., 2004) et les sols de la dorsale tunisienne (Nesrine, 2009). Cette typologie est basée sur l'organisation structurale de la surface du sol. Elle prend en compte plusieurs éléments d'origine minérale ou organique situés à la surface du sol et dans les dix premiers cm du sol qui vont intervenir dans le partage entre le ruissellement et l'infiltration (Andrieux, 2008). Il s'agit entre autres de la présence ou non d'une croûte de surface et de son type, de la couverture du sol par une végétation ou une litière, de la présence de cailloux (Corbane et al., 2008). Chacun des états de surface décrits est caractérisé par des propriétés d'infiltrabilité du sol. L'influence de la répartition spatiale des états de surface sur l'humidité à la surface du sol a par ailleurs été étudiée (Hébrard et al., 2006).

Sur la base d'une telle typologie, il est possible de modéliser la dynamique d'évolution des états de surface sous l'effet conjoint des pratiques d'entretien du sol et du climat et, en utilisant les propriétés d'infiltration des états de surface, d'aboutir à une modélisation continue dans le temps de l'infiltration à la parcelle. Pour les systèmes de culture viticoles, la dynamique des états de surface a été analysée pour différentes modalités d'entretien du sol et a permis d'identifier plusieurs trajectoires d'évolution des états de surface des sols en fonction des caractéristiques des sols, des événements climatiques et des itinéraires techniques mis en œuvre par les viticulteurs (Paré, 2007). Sur cette base, un modèle empirique prédictif d'évolution des états de surface des sols sans couvert herbacé entretenus par travail du sol a été développé (Paré *et al.*, 2011). Pour être en mesure de caractériser de manière dynamique l'effet des différentes modalités d'entretien du sol sur le ruissellement, de tels modèles doivent être développés pour plus large gamme de choix techniques (enherbement permanent, enherbement temporaire maîtrisé par travail du sol ou désherbage chimique, etc.)

L'impact des pratiques sur le ruissellement polluant ne peut pas être évalué uniquement à l'échelle de la parcelle, mais doit l'être également à celle du bassin versant qui concentre le ruissellement issu des

différentes parcelles qui le composent. A cette échelle, la mosaïque des états de surface et leur position relative le long des versants jouent sur les flux avec pour conséquence une augmentation ou une diminution du ruissellement polluant, comme l'ont par exemple montré les travaux de Moussa *et al.* (2002) et de Colin *et al.* (2012). L'évaluation de l'impact d'une mosaïque donnée d'états de surface sur les flux d'eau et de matières associées est en effet possible à l'aide d'un modèle hydrologique distribué prenant en charge les effets de la distribution spatiale des états de surface, des apports de pesticides et des aménagements paysagers. Ainsi, dans les travaux mentionnés ci-dessus, le modèle Mhydas (Moussa *et al.*, 2002 ; Chahinian, 2004) a été utilisé pour tester l'impact sur les flux d'eau d'organisations spatiales différenciées d'états de surface du sol dans un petit bassin versant viticole (1 km²) pendant un événement pluvieux de forte intensité. Conçu pour fonctionner à l'échelle de l'événement de crue, ce modèle doit être complété par des modules à développer pour permettre la simulation dynamique des processus tout au long d'un cycle cultural.

L'utilisation d'un tel modèle hydrologique distribué sur la durée d'un cycle cultural nécessite de représenter l'évolution de la mosaïque des états de surface liée à la mise en œuvre des choix d'entretien du sol dans le contexte particulier des exploitations du bassin versant et du climat de l'année. Cette représentation est un enjeu de modélisation qui nécessite de pouvoir simuler sur chacune des parcelles du bassin versant les itinéraires techniques qui influencent la dynamique d'évolution des états de surface du sol. En effet, la mise en œuvre d'une même modalité d'entretien du sol (par travail du sol par exemple) dans deux exploitations différentes ne signifie pas que les deux exploitations auront strictement les mêmes itinéraires techniques (mêmes opérations culturales aux mêmes dates) comme cela est considéré dans la plupart des évaluations environnementales (ex : Giupponi *et al.*, 1999 ; Mignolet *et al.*, 2004 ; Souchère *et al.*, 2009). Les itinéraires techniques dépendent notamment des disponibilités en matériel et main d'œuvre, de l'organisation du travail dans les exploitations et de l'évolution d'indicateurs d'état des agrosystèmes à conduire dont il faut pouvoir rendre compte (Aubry *et al.*, 1998a ; 1998b ; Papy, 2001). Différents travaux ont montré qu'en formalisant les choix de conduite technique et d'organisation du travail sous forme de règles d'action et/ou de plan d'activités, il était possible de reproduire l'ordonnancement des opérations culturales et de simuler leurs dates de réalisation (Leenhardt et Lemaire, 2002 ; Martin-Clouaire & Rellier, 2009). Dans une perspective future de couplage dynamique avec un modèle hydrologique, l'enjeu est de développer un modèle spécifique aux systèmes de culture viticoles qui permette de simuler les itinéraires techniques simultanément pour l'ensemble des exploitations d'un bassin versant.

Evaluation des contraintes à la mise en œuvre des pratiques

La recherche de distributions spatiales de modalités d'entretien du sol permettant d'améliorer la fonction de régulation des flux à l'échelle du bassin versant ne saurait se réduire à la seule évaluation de l'impact environnemental de différents scénarii de distributions spatiales. Elle nécessite également d'évaluer les marges de manœuvre des exploitants d'un bassin versant pour adopter des pratiques permettant de réduire les flux (Joannon *et al.*, 2005 ; 2006). Deux classes de marges de manœuvre peuvent être étudiées : l'une relevant de l'impact des pratiques sur les niveaux de production, l'autre de l'acceptabilité individuelle et collective des pratiques du point de vue des agriculteurs.

Risques de pertes de rendement liés à des stress hydrique et azoté

L'enherbement temporaire ou permanent des inter-rangs est une pratique qui s'est développée ces dernières années en réponse aux préoccupations environnementales (protection des sols et réduction du recours aux herbicides). En 2006, 14 % des parcelles du Languedoc-Roussillon faisaient l'objet d'un enherbement permanent sur tout ou partie de la surface du sol (Mezière *et al.*, 2009) contre 20 % environ aujourd'hui (Enquête pratiques culturales Agreste, 2012). Mais cette pratique génère des contraintes qui limitent son développement. Un point important concerne la concurrence avec la vigne pour les ressources du sol (eau, azote) qui peut entraîner des baisses de rendement significatives.

La question de la concurrence pour les ressources en eau et en azote du sol entre la vigne et un couvert herbacé est maintenant bien documentée. La dynamique spatiale et temporelle des prélèvements par les deux peuplements végétaux est différente. Certaines compensations sont

possibles pour la ressource hydrique : on observe une redistribution du système racinaire de la vigne en réponse à l'installation d'un enherbement (Celette *et al.*, 2005), la présence d'un enherbement hivernal permet un supplément d'infiltration qui peut égaler les deux tiers du supplément de transpiration occasionné au printemps (Celette *et al.*, 2008). En revanche, l'azote est une ressource disponible seulement dans les horizons de surface. Dans une parcelle enherbée, il est moins accessible à la vigne du fait des prélèvements en azote du couvert herbacé et du fait de la moindre minéralisation de la matière organique dans des horizons de sol asséchés par ses prélèvements d'eau (Celette *et al.*, 2009).

D'une façon générale, la croissance végétative et reproductive de la vigne est très dépendante de la dynamique de son état hydrique (Pellegrino *et al.*, 2005), lui-même dépendant de l'état des ressources en eau du sol (Pellegrino *et al.*, 2004). L'analyse de la trajectoire de contrainte hydrique subie par la vigne au cours d'un cycle de culture permet de porter un diagnostic sur ses performances en termes de développement végétatif, de rendement et de qualité de la récolte (Gary *et al.*, 2005 ; Pellegrino *et al.*, 2006, Guilpart *et al.*, 2104).

En termes de modélisation, le bilan hydrique d'une parcelle viticole peut être simulé en conditions de sol nu (Trambouze et Voltz, 2001 ; Lebon *et al.*, 2003) comme en conditions enherbées (Celette *et al.*, 2010). La prédiction des performances productives de la vigne peut être réalisée de manière indirecte en associant des indicateurs d'état hydrique à des niveaux de développement végétatif, de rendement et de qualité des produits (Ripoche *et al.*, 2010a ; 2010b). Elle peut également être réalisée de manière explicite à travers des modèles intégrés de bilan hydrique et azoté, et d'élaboration du rendement et de la qualité dans des parcelles viticoles sur sol nu (Valdés-Gómez *et al.*, 2009) ou enherbé (Metay *et al.*, 2009).

Acceptabilité individuelle et collective des pratiques

L'adoption de modalités d'entretien du sol visant à réduire l'usage des herbicides et/ou à maintenir le sol dans un état le plus infiltrant possible tout au long du cycle cultural, n'est pas forcément facilement envisageable pour toutes les exploitations. De nombreux travaux d'agronomes et de sociologues (Aujas *et al.*, 2011 ; Chantre et Cardona, 2014 ; Cerf *et al.*, 2010 ; Simon *et al.*, 2011) ont montré l'intérêt d'identifier, du point de vue situé des agriculteurs, quels sont les freins mais aussi les marges de manœuvre à la mise en œuvre, dans les exploitations, de pratiques alternatives, du point de vue technique (reconfiguration des systèmes techniques), organisationnel (pointes de travail et concurrence entre travaux, équipements nécessaires, profil de main d'œuvre requis, etc.), économiques (surcoûts éventuels engendrés par la mise en œuvre et/ou la recombinaison des modalités techniques et les risques encourus), social (mettant en jeu les relations et les formes de coordination avec les autres viticulteurs). Les travaux des sociologues ont notamment montré l'importance des ressources sociales et cognitives et le rôle des normes propres à des collectifs dans la dynamique de changements de pratiques des agriculteurs. Ils ont montré comment, du fait de certaines caractéristiques des réseaux sociaux dans lesquels ces derniers se trouvent insérés - réseaux constitués par l'ensemble des relations de dialogues professionnels qu'ils nouent entre eux et avec les agents de l'encadrement technique sur une zone donnée - ces agriculteurs se trouvent socialement et cognitivement plus ou moins bien armés pour faire face aux changements auxquels ils sont confrontés (tels que ceux touchant à la mise en œuvre d'une agriculture durable). Certains réseaux, en fonction de leur forme, de leur densité et de leur connections extérieures, sont apparus être plus efficaces que d'autres dans la capacité qu'ils offrent aux agriculteurs de porter collectivement des changements (Compagnone, 2010). Il a pu être montré, en particulier, comment les diverses connaissances nécessaires aux changements de pratiques peuvent être, non pas partagées par l'ensemble des agriculteurs d'un réseau, mais distribuées entre eux, et comment une organisation informelle permet aux membres de ce réseau d'accéder plus ou moins facilement aux détenteurs de ces ressources, selon leur position et leurs caractéristiques sociologiques (Compagnone, 2004). Ces réseaux ont été étudiés à partir d'un territoire donné, commune (Valdivieso et Compagnone, 2009) ou bassin versant (Houdart *et al.*, 2011), ou d'agriculteurs apparaissant comme des innovateurs (Compagnone et Hellec, 2009).

Objectifs, démarche et plan du rapport

Dans ce contexte, le projet s'est fixé comme objectif d'identifier et d'évaluer, en viticulture méridionale, des modalités d'entretien du sol et des répartitions spatiales de ces modalités permettant de réduire à l'échelle du bassin versant la contamination des eaux de ruissellement par les herbicides, tout en étant économiquement, techniquement et socialement acceptables par les viticulteurs. Pour cela, le projet a été basé (i) sur l'élaboration d'une démarche d'identification et d'évaluation de stratégies de réduction des usages d'herbicide aux échelles de la parcelle, de l'exploitation agricole et du bassin versant et (ii) sur le développement d'outils de modélisation nécessaires à la démarche.

La démarche générale est décrite dans la Figure 1. Le point de départ de la démarche a été l'identification à dire d'experts de stratégies de réduction de l'usage des herbicides, dites « stratégies candidates », à l'échelle du bassin versant (BV). Ces stratégies définissent (i) des cibles à atteindre en termes d'intensité d'utilisation d'herbicide aux échelles de la parcelle et du bassin versant, (ii) des modalités d'entretien du sol permettant l'atteinte de ces cibles, tout en réduisant les risques de ruissellement et (iii) des règles de répartition des modalités entre les différentes parcelles en vigne du bassin versant. Ces stratégies sont indépendantes du bassin versant d'application.

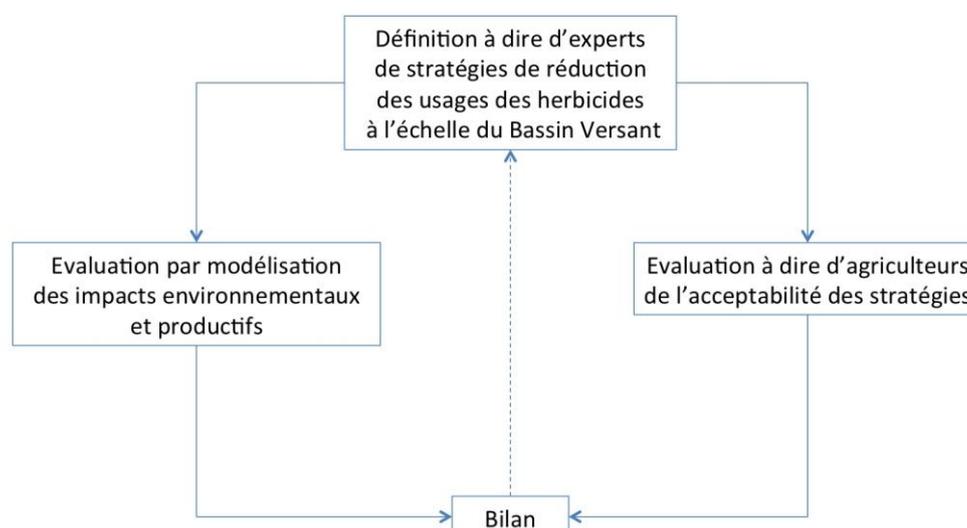


Figure 1 : Démarche générale

Dans un deuxième temps, les stratégies ont été soumises à une double évaluation, sur le bassin versant d'application de la démarche :

- une évaluation des performances environnementales et productives permises par la mise en œuvre de ces stratégies, aux échelles du bassin versant et/ou de la parcelle. Ces évaluations ont été réalisées à l'aide de chaînes de modèles dont certains ont été développés au cours du projet ;
- une évaluation des possibilités de changement de pratique à partir d'enquêtes auprès des agriculteurs. Cette deuxième évaluation a été réalisée sur la base d'entretiens auprès d'un échantillon de viticulteurs du bassin versant.

Finalement les résultats de chacune de ces évaluations ont été comparés pour établir un bilan des impacts environnementaux et productifs des stratégies proposées et à donner des pistes de choix de nouvelles stratégies mieux adaptées aux contraintes des viticulteurs.

La démarche détaillée et le plan du rapport sont présentés sur la Figure 2.

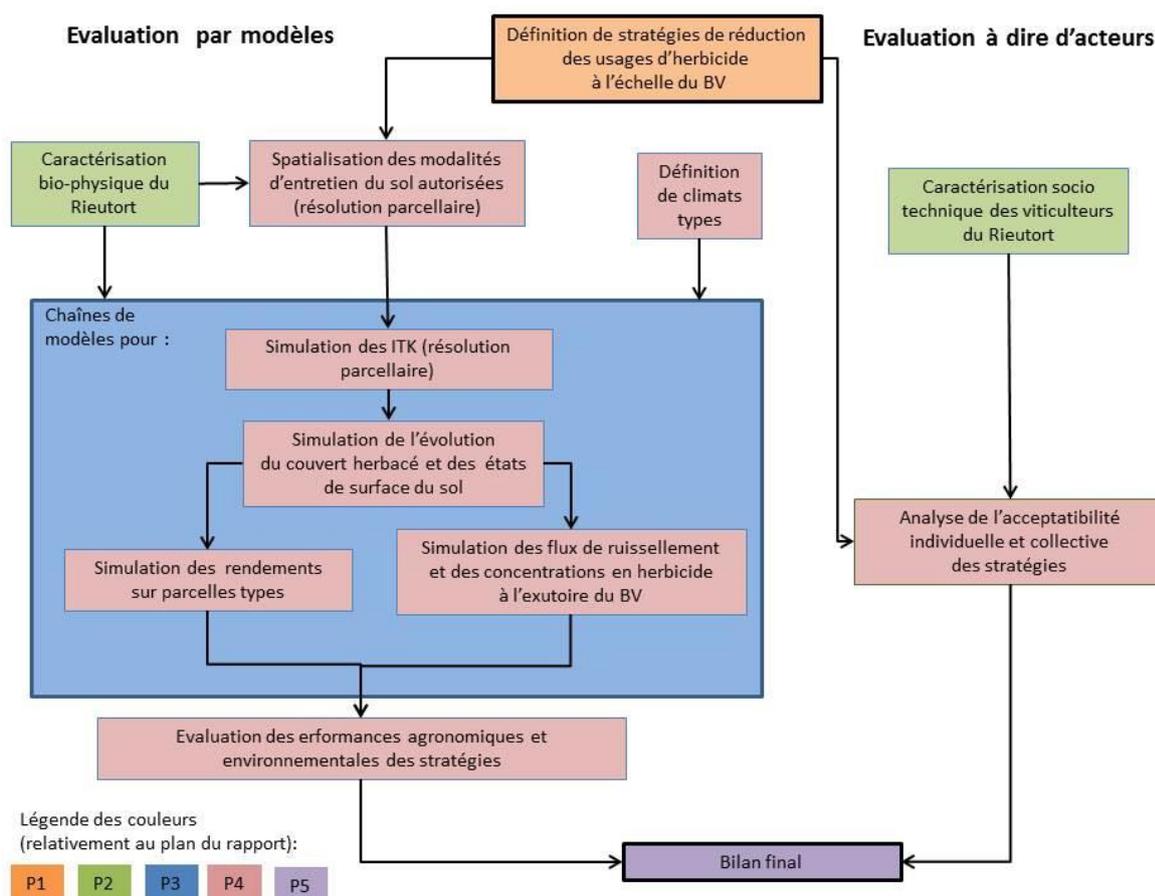


Figure 2 : Détail de la démarche et plan du rapport

Deux séances de travail collectives ont jalonné le programme SP3A.

- Une réunion de lancement du programme SP3A (23 mai 2011) a réuni l'ensemble des partenaires scientifiques et non scientifiques, ainsi que quatre animateurs de bassin, des socio économistes (UMR LAMETA) et deux représentants de la DREAL Languedoc-Roussillon et de l'agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse. Elle a permis de dresser une liste de trois BV candidats pour notre étude (BV de la Payne et du Rieutort dans l'Hérault et Bv du Briançon dans le Gard).

Le site finalement retenu est le BV du Rieutort dans l'Hérault. Les raisons majeures de ce choix sont :

- un fonctionnement hydrologique relativement simple et homogène contrairement à d'autres BV, présentant notamment des zones de karst sur la zone amont ;
- la volonté de mettre en œuvre des changements de pratiques culturales sur le Rieutort ;
- l'existence d'un enjeu sociétal fort avec la présence d'un captage prioritaire « Grenelle » sur le BV du Rieutort, avec la présence d'un animateur de bassin.

- Un séminaire d'une journée, organisé le 31 mai 2012, a permis de proposer et discuter des différentes stratégies de réduction des herbicides à prendre en compte dans le programme SP3A à l'échelle des parcelles et du bassin versant. Cette réunion a réuni les chercheurs du programme ainsi que des animateurs de bassin et des conseillers agricoles.

La partie 1 du rapport présente les principes d'identification de stratégies candidates et les quatre stratégies retenues.

La partie 2 s'attache à décrire le bassin versant choisi pour cette étude, tant du point de vue des caractéristiques et contraintes bio-physiques que des caractéristiques socio-techniques (pratiques d'entretien du sol actuelles et réseaux de dialogue) des viticulteurs du bassin.

Les outils de modélisation utilisés ou développés pour l'évaluation par modèles des performances agronomiques et environnementales des stratégies candidates sont décrits dans **la partie 3**. Ces modèles permettent de simuler sous différents climats (1) les itinéraires techniques résultant de la mise en œuvre par les exploitations du bassin versant des modalités d'entretien du sol autorisées et de leur distribution spatiale pour chacune des stratégies candidates, (2) l'évolution du couvert herbacé et des états de surface du sol sous l'effet des itinéraires techniques et du climat, (3) les rendements et (4) les flux de ruissellement polluant.

Les évaluations réalisées sur le bassin versant du Rieutort à l'aide de ces modèles sont présentées dans **la partie 4**. Pour chacune des stratégies, elles ont été réalisées pour neuf climats types représentant la variabilité climatique interannuelle de la zone et sur la base d'une répartition spatiale des modalités d'entretien du sol associées. Finalement, la synthèse-conclusion du rapport (**partie 5**) établit un bilan des évaluations par modèles et le compare aux analyses de l'acceptabilité individuelle et collective des stratégies de réduction d'herbicide et des modalités d'entretien du sol associées.

Partie 1

Identification de stratégies de réduction des risques de ruissellement polluant

Le recours à des modèles de simulation doit permettre d'explorer les impacts et conséquences possibles ou probables de divers scénarios d'évolution des pratiques agricoles (d'entretien du sol) et des conditions (écologiques, socio-économiques) dans lesquelles celles-ci seront mises en œuvre. L'expérimentation étant impossible à l'échelle d'un bassin versant, la modélisation à des fins de simulation représente un moyen pour évaluer, sous réserve des conditions de validité des modèles, différentes alternatives ou futurs possibles. Au sein de cette démarche, une étape doit être consacrée à la construction des scénarios ; cette construction est souvent menée par un collectif mettant à contribution ses différents membres et pouvant faire appel à des « experts » extérieurs. Au final les scénarios retenus pour l'évaluation sont le résultat d'un compromis entre :

- les connaissances et hypothèses partagées par le collectif,
- une certaine vision de l'avenir ou de ce vers quoi il convient de tendre,
- les questions appliquées auxquelles le collectif souhaite répondre et les limites qu'il fixe dans le champ des explorations
- les possibilités offertes par les modèles et les données disponibles pour effectuer les calculs et simulations.

1 Méthodes

La démarche mise en place a reposé sur 5 étapes successives.

1- Une identification (Cothenet et al, 2012) à partir de la bibliographie et de rencontre d'experts (i) des leviers d'action techniques envisageables pour réduire la pollution des eaux de captage à partir du vignoble, (ii) des pratiques candidates (et de leurs variantes) correspondant à ces leviers d'action et leur localisation préférentielle dans le bassin versant, (iii) de leur degré actuel de mise en application dans ce même bassin versant, (iv) des contraintes de mise en œuvre qu'elles rencontrent ou rencontreraient et des risques (mais aussi des bénéfiques) possibles suite à leur mise en application, que ce soit sur le plan technique, environnemental, économique ou social. Cette première étape d'exploration très large fut réalisée par un collectif d'étudiants en projet d'ingénieurs.

2- Une identification (Cothenet et al, 2012) des données disponibles et notamment de toutes les données spatialisées : climatiques, topographiques, pédologiques, hydrologiques (notamment fossés et talus), paysagères, parcellaires (limites parcellaires, occupation du sol et exploitation agricole de rattachement, engagement ou non dans des cahiers des charges AB, agriculture raisonnée, MAEt).

3- Une analyse bibliographique de la notion de scénario et des démarches de scénarisation.

4- Une réflexion collective de construction en interne de scénarios réunissant l'ensemble des partenaires (chercheurs et acteurs de l'accompagnement impliqués) du projet et s'appuyant sur les étapes précédentes.

5- L'Interview individuel (par un tiers) de ces partenaires pour recueillir des précisions et justifications sur les choix effectués, ainsi que des points de vue voire controverses sur les choix collectifs réalisés.

La réflexion collective fut menée en trois temps : (i) un premier atelier permis de scinder le groupe en deux sous-groupes (composés de chercheurs et acteurs de l'accompagnement) ayant pour consigne d'élaborer une première proposition d'objectifs et de niveaux d'exigence (éventuellement spatialisés) pour une évolution des pratiques de désherbage et d'entretien du sol dans le bassin versant du

Rieutort ; la confrontation des deux propositions permis d'élaborer un premier compromis. Un tour d'horizon des pratiques agricoles candidates pour chaque niveau d'exigence et de leur combinaison possible put alors être mené. (ii) Un compte rendu de séance complété par un travail d'enquêtes et entretiens individuels auprès d'agriculteurs (Chavassieux, 2013) ont conduit à corriger certaines insatisfactions et préciser les points encore insuffisamment stabilisés. (iii) Enfin, une prise de recul collective tenant compte notamment des contraintes liées à la modélisation, nous a conduit à ne retenir qu'un nombre réduit de stratégies.

2 Résultats

2.1 Analyse réflexive sur la démarche utilisée et les résultats obtenus

L'analyse de la littérature concernant les démarches de scénarisation nous a permis de mieux positionner le travail réalisé par le collectif de partenaires du projet.

Il existe aujourd'hui une assez abondante littérature faisant le point sur les différentes acceptions de la notion de scénario (Simon, 2006 ; Leenhardt et al, 2012 ; Biggs et al, 2007 ; Godet, 2000 ; van Notten et al., 2003 ; Wilkinson and Eidinow, 2008). Si un scénario est « une description logique et cohérente d'une situation future hypothétique qui reflète différents points de vue sur la dynamique passée, l'état du présent et les évolutions à venir et qui peut être utilisée comme base pour penser l'action », il est possible de distinguer, dans les démarches de construction, les cas où sont explorés plutôt des futurs préférables (souhaités ou encore désirés), des futurs probables ou encore des futurs possibles. Une démarche de scénarisation est en principe réservée pour traiter d'évolutions à forts degrés d'incertitude ou les facteurs agissant sont largement non contrôlables et plus ou moins imprévisibles dans l'étendue de leurs effets. Généralement une analyse en terme de scénarios fixe un horizon temporel de projection (différent selon la nature du problème traité) et compare les projections avec la situation actuelle ou un scénario « business as usual » (baseline scenario).

On distingue habituellement les scénarios prédictifs, exploratoires et normatifs. Les scénarios prédictifs visent à réaliser des prévisions ; ils peuvent permettre de répondre à des questions du type « que se passera t-il si ... », un état donné d'éléments du futur pouvant alors être décrits (on les considère comme probables) ; les scénarios exploratoires tentent de décrire différents futurs possibles sous une forme plutôt narrative (ils répondent à une question du type « que peut-il se passer ? », « quel avenir pour ... ? ») ; enfin les scénarios normatifs cherchent à examiner comment un objectif spécifique peut être atteint (que faire pour ... ? ». Il est d'usage également de distinguer des scénarios tendanciels (preserving scenarios) - cela signifie que l'on se contente de prolonger une dynamique actuelle ou que simplement on ajuste par rapport à la situation courante, les principaux déterminants (ou drivers) d'évolution étant connus - par opposition à des scénarios de transformation (on peut également dire de rupture ou radicaux) où l'on remet en question la structure, l'intégrité du système (on juge qu'il n'est pas possible d'atteindre l'état final en continuant sur la trajectoire actuelle et avec une structure identique). Enfin on peut différencier les « problem-focused scenarios » tournés vers la résolution d'un problème dont la formulation n'est pas obligatoirement attribué aux acteurs ou groupes d'acteurs concernés, des « actor-focused scenarios » ou « reflexive multi-agent based scenarios » dans lesquels les approches participatives sont requises et où la démarche contribue autant à l'apprentissage collectif qu'à fournir des réponses en tant que telles (Johnson et al, 2012 ; Reed et al, 2013).

A la lumière de ces terminologies et définition, il a été possible de positionner le travail réalisé au sein du collectif de partenaires du projet. Comme nous le verrons dans la suite nos « scénarios » décrivent un futur préférable, souhaité (en matière d'intensité d'usage de pesticides) pour les parcelles viticoles du bassin versant. Par ailleurs, ils explorent des moyens techniques possibles (utilisables par des agriculteurs) pour atteindre cet objectif (ils pavent et bornent des chemins possibles pour l'atteindre). A ce titre ils entrent dans la catégorie des scénarios normatifs ; ils sont à caractère tendanciels car

conserve l'intégrité des systèmes en place en prolongeant une dynamique existante et ils visent à résoudre un problème (pollution des zones de captage d'eau potable) identifié par des acteurs extérieurs au système proprement dit et sans velléité de concertation avec ceux-ci pour leur élaboration. Enfin ils ne fixent pas d'horizon de temps particulier. Fort de cette analyse, il a semblé préférable de ne pas conserver la dénomination « scénarios » dans la suite du travail (même si, on vient de le voir, il a été possible d'analyser notre activité de conception à la lumière d'une telle littérature) ; il a été décidé de parler de « stratégies candidates » rapprochant notre travail des scénarios de type « stratégique » (Wilson, 2000) courant dans le monde de l'entreprise où on se focalise sur des facteurs internes ou endogènes d'évolution, délaissant (pour un temps) les influences extérieures.

2.2 Les stratégies candidates : principes d'élaboration, stratégies et pratiques alternatives, justifications et limites.

Tableau 1 : Les stratégies candidates retenues

Stratégie	Objectif IFT annuel à l'échelle du BV	Usages d'herbicides associés
1a	0	0 herbicide sur le rang (R) et inter-rang (IR)
1b	≤ 0,1	Idem stratégie 1a avec autorisation d'un désherbage de post-levée intégral sur parcelles très contraintes (maxi 10 % de la superficie en vigne du BV)
2a	≤ 0,3	Autorisation d'un désherbage de post-levée sur 1/3 de la superficie de la parcelle (≈ sur le R)
2b	0,3 – 0,4	Idem stratégie 2a avec autorisation d'un désherbage de post-levée intégral sur parcelles très contraintes (maxi 10 % de la superficie en vigne du BV)

Le Tableau 1 présente les stratégies candidates retenues. Ces stratégies candidates doivent servir de base aux simulations numériques. Pour cela, l'objectif était d'obtenir un nombre limité de stratégies candidates, relativement simples et contrastés. Les paragraphes suivants les explicitent et présentent les justifications fournies par les concepteurs en atelier collectif et suite à des interviews individuels conduits auprès de chacun d'eux.

Le choix est fait de réduire la pression polluante sur le bassin versant en ciblant des valeurs d'IFT (indice de fréquence de traitement) à ne pas dépasser pour l'ensemble du bassin versant. On élabore deux options correspondant à deux niveaux d'ambition ou d'exigence (élevé et moyen). Un premier niveau impose de ne pas dépasser un IFT bassin versant de 0,1 et le second le limite à 0,4. Sachant que l'IFT moyen régional en Languedoc-Roussillon pour les herbicides est de 1,09, il s'agit donc de stratégies plutôt ambitieuses.

Le choix de se concentrer uniquement sur la variable de pression et non sur les processus de transfert provient de plusieurs considérations (i) le remplacement de désherbage chimique par le travail du sol ou l'enherbement contribue, en même temps qu'il diminue l'usage du polluant lui-même, à réduire les processus de ruissellement qui sont prépondérants en milieu viticole méditerranéen (ii) l'intensité des pluies en méditerranée et la nature des écoulements rend illusoire la possibilité de freiner très fortement les phénomènes de transferts par de simples bandes enherbées.

La focalisation sur les herbicides uniquement est justifiée par le fait que ce sont les molécules que l'on retrouve préférentiellement et actuellement dans les eaux de captage (au-dessus des seuils d'acceptation). Les herbicides ont été massivement utilisés en viticulture et, contrairement aux insecticides et fongicides, avec des familles dominantes (triazines dans le passé, glyphosate aujourd'hui). Les autres sources de pollution existent mais à cause d'un effet de dilution, il ne leur est pas encore accordé la même priorité.

On n'autorise pas a priori d'arrangements entre agriculteurs ; ceux-ci sont tous logés à la même enseigne et les pollutions potentielles plus fortes de l'un ne peuvent être compensées par un voisin qui n'utiliserait pas du tout d'herbicides. Quoiqu'envisageable en travaillant à l'échelle du bassin versant cette option n'est pas retenue car (i) jugée trop irréaliste pour une mise en place effective et (ii) impossible à insérer dans les outils de simulation et (iii) ne permettant pas la maximisation de l'effort nécessaire de réduction des utilisations d'herbicide.

On ne différencie pas de zones vulnérables ou sensibles et on n'autorise pas d'ajustements annuels des règles (autorisation de dépassement de l'IFT bassin versant en fonction de la pluviométrie de l'année, notamment en année pluvieuse où les pousses d'herbes seraient importantes et les conditions d'intervention difficiles). Pour le premier point, cela est justifié par la généralisation sur le milieu d'étude (i) d'un régime pluviométrique avec précipitations intenses sous formes orageuses (ii) de processus de ruissellement forts liés à la faible couverture du sol et à des capacités d'infiltration des sols faibles et (iii) de l'occurrence de réseaux de fossés qui augmentent la vitesse générale d'écoulement. La prise en compte du second point fut également jugée irréaliste sur le plan de la faisabilité (quel seuil choisir ? comment compenser entre années ?) et de l'implémentation dans les modèles.

Les choix précédents reviennent ainsi à n'accorder aucun permis à polluer (aucune compensation).

Les herbicides de pré-émergence sont considérés comme plus « nocifs » que les autres et ne sont donc pas autorisés. Les herbicides de pré-émergence sont des produits systémiques qui sont positionnés en préventif, par anticipation. Cela signifie que même en année sèche avec peu de pousse d'herbe, ils seront appliqués. Positionnés en pré-émergence sur le sol ils sont plus susceptibles d'être emportés en cas de pluies.

Si les compensations ne sont pas envisagées, par contre il est instauré des « dérogations » sur des conditions de faisabilité technique, en bornant toutefois l'étendue des dérogations (10 % de la surface maximum dans chaque exploitation et donc pour l'ensemble du bassin versant). Ce faisant on cherche à introduire une souplesse pour l'acceptabilité des nouvelles pratiques de réduction d'usage des herbicides et ces dérogations doivent permettre a minima de tenir compte d'une variabilité interannuelle des conditions (de pousse de l'herbe, d'intervention...).

Quatre conditions dérogatoires ont été envisagées, mais seule la dernière a été retenue, pour l'évaluation par modélisation.

- L'impossibilité de travailler le sol à cause d'une humidité excessive : cette condition dérogatoire, notamment pour les terrains de plaine, fut finalement éliminée car (i) trop difficile à incorporer dans la modélisation ; outre les seuils à déterminer cela revenait à prendre en compte une variabilité climatique interannuelle et (ii) sur les terrains de plaine souvent humide, l'enherbement peut être une alternative et celle-ci fait partie des options préconisées.
- Pente et teneur des sols en cailloux: cette contrainte n'a pas été retenue car s'il est possible de connaître les pentes des parcelles, la difficulté de pratiquer le travail du sol sur ces terrains est très dépendante du sens de la plantation (il convient donc de disposer d'une donnée supplémentaire). De même il s'est avéré impossible de traiter la question de la pierrosité car les données sont lacunaires et d'autres facteurs conditionnent la travaillabilité de la parcelle (notamment le type de matériel utilisé) ; par ailleurs les sols pierreux sont aussi souvent moins enherbés.
- Historique de la parcelle: réhabilitation de vignes abandonnées. En cas d'achat de nouvelles terres et pour la réhabilitation d'une parcelle non entretenue pendant plusieurs années, il peut être utile de réduire chimiquement au début le stock de graines du sol. L'identification de ces parcelles étant difficile à obtenir à l'échelle d'un bassin versant, cette contrainte n'a pas plus été retenue.
- Type de plantation: les vignes à inter-rangs étroits. Ces vieilles vignes sont très difficilement mécanisables et sont celles pour lesquels les agriculteurs sont les plus réticents à

abandonner l'usage des herbicides. Cette contrainte est la seule retenue car ces vignes sont facilement repérables sur des images satellites.

Si le système se focalise sur les herbicides, les produits d'épamprage¹ (qui sont des herbicides) ne sont cependant pas pris en compte ; ceux-ci sont souvent négligés et les quantités de produits utilisés seraient faibles en regard de ceux utilisés pour le désherbage proprement dit (ce point mériterait toutefois d'être mieux étudié). Les désherbages en taches (en été) ne sont pas considérés ici du fait de la difficulté d'estimer la surface et les doses réellement utilisées ; cette possibilité mériterait toutefois d'être étudiée car c'est une pratique très utilisée par les viticulteurs et cela peut représenter une réelle source de souplesse pour s'adapter au climat de l'année.

Les alternatives techniques pour atteindre les objectifs sont ici l'enherbement spontané permanent, ou l'enherbement spontané temporaire détruit en fin d'hiver par travail du sol. Le désherbage thermique et le mulching, pour ne citer que ces deux-là, n'ont pas été pris en considération. Enfin le désherbage des plantiers n'est pas abordé parce que les jeunes plants représentent une faible surface dans le bassin versant.

¹ Opération consistant à débarrasser un cep de vigne des rameaux (ou pampres, ou gourmands) afin de favoriser la maturation des branches fruitières porteuses de raisin. Cette opération s'effectue au printemps, du débournement à la floraison (*Wikipedia*).

Partie 2

Caractérisation et état des lieux d'un bassin versant viticole à enjeux : le bassin versant du Rieutort

Introduction

Cette partie présente les caractéristiques du bassin versant viticole qui a servi de support au projet. Le milieu est d'abord décrit, puis les contraintes hydriques associées à ce contexte. Cette étude sur les contraintes, a permis de prendre en compte des pratiques d'entretien du sol, techniquement acceptables par les viticulteurs. Une seconde partie présente les caractéristiques socio-techniques d'un échantillon représentatif de viticulteurs du bassin versant. Les structures de leurs exploitations agricoles, les pratiques d'entretien du sol actuelles puis les réseaux de pairs dans lesquels les viticulteurs s'insèrent, sont successivement présentés.

Cette partie s'est appuyé sur la constitution d'une base de données spécifique pour le projet (Cothenet et al., 2012), formalisée à partir de données existantes. Cet ensemble de données a été complété durant le projet, par le recueil de nouvelles données, par exemple pour caractériser la flore et végétation herbacée du bassin versant mais aussi pour la partie socio-technique.

1 Le milieu physique et l'occupation du sol

1.1 Principales caractéristiques du milieu

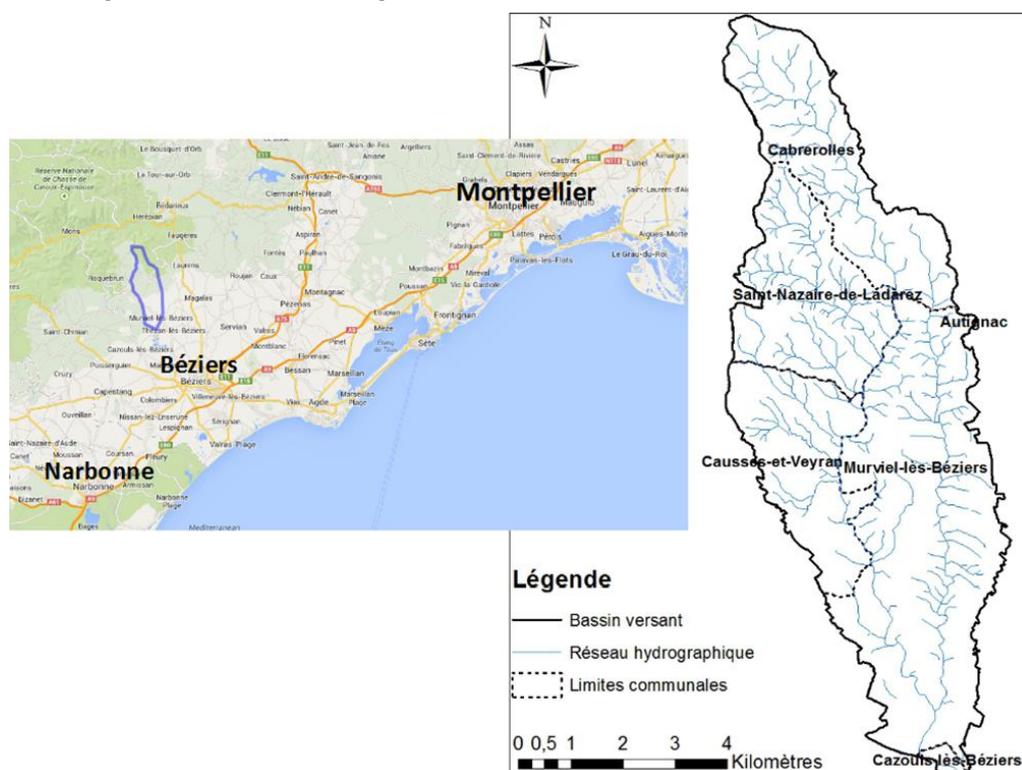


Figure 3: Localisation du bassin versant du Rieutort

Le bassin versant du Rieutort s'étend sur 45 km², dont 15,4 km² sont consacrés à la culture de la vigne. Il est localisé au nord de Béziers, 90 km à l'ouest de Montpellier, en bordure des premiers contreforts du massif central (Figure 3). Il recouvre partiellement le territoire de quatre communes (Murviel-lès-Béziers, Cabrerolles, St Nazaire de Ladarez et Causses-et-Veyran).

Le bassin versant du Rieutort fait partie du bassin d'alimentation d'une aire de captage d'Alimentation en Eau Potable (AEP), le captage du Limbardié, qui alimente la commune de Murviel-lès-Béziers. Dans le cadre du contrôle sanitaire opéré par la DDASS de l'Hérault, plusieurs analyses ont mis en évidence la présence répétée de pesticides dans les eaux du captage. Les pesticides identifiés ont été principalement des herbicides, glyphosate, AMPA, simazine et terbutylazine (DDTM Hérault, 2014). Ce captage, localisé dans la plaine de l'Orb près de l'exutoire du Rieutort, a été classé « captage Grenelle », dans la liste des captages les plus menacés par les pollutions diffuses (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie).

Le bassin est caractérisé par des paysages contrastés permettant de différencier trois grandes zones (Figure 4) : au nord, des coteaux au relief marqué, où la garrigue et la forêt dominent, au centre, une zone vallonnée principalement occupée par la culture de la vigne et au sud, la plaine viticole de l'Orb. L'altitude varie de 20 m au sud à 650 m au nord du bassin.

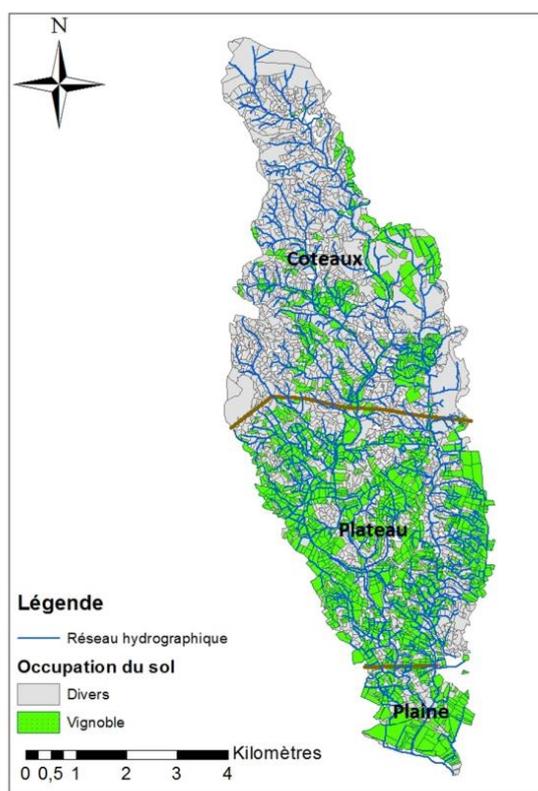


Figure 4: Occupation du sol et réseau hydrographique

Le climat est de type méditerranéen, caractérisé par des automnes pluvieux et des étés chauds et secs avec des pluies torrentielles et une forte variabilité inter-annuelle des pluies. D'après les données de pluviométrie, relevées sur un bassin versant instrumenté proche du Rieutort (le bassin de Roujan, UMR LISAH), la pluviométrie moyenne annuelle sur les 20 dernières années est de 690 mm avec un maximum de 1585 mm et un minimum de 311 mm.

Le réseau hydrographique, naturel et anthropique (fossés), est dense (Figure 4). Ce réseau a été reconstitué à partir de trois sources de données : (1) la base de données Topo® qui représentent le réseau de ruisseaux et de rivières, (2) des relevés de terrain qui ont permis de cartographier de façon exhaustive le réseau de fossés agricoles dans quatre zones contrastées du bassin ; (3) une

orthophotographie récente (2012) qui a permis de compléter le dessin du réseau de fossés. La densité moyenne reconstituée des fossés est de 58 m de fossé par ha.

La distribution des sols dans le paysage est marquée par une différenciation nord sud liée à la géomorphologie du bassin (Figure 5). Cinq grandes classes de sol, définies à partir des caractéristiques de texture et de taux de cailloux de la couche superficielle du sol de chacune des 37 unités de sols présentes sur la carte pédologique (feuille de Lodève au 1/100 000, INRA 1993), peuvent être distinguées :

1. les sols caillouteux en surface, peu à moyennement profond, principalement développés sur les schistes des coteaux du nord ;
2. les sols plutôt argileux de la zone de transition entre les schistes des coteaux du nord et la molasse plus au sud ;
3. les sols sur molasse, peu caillouteux, assez profond, issus de dépôts calcaires marins ;
4. les sols fersialitiques lessivés, développés sur des alluvions caillouteuses ;
5. les sols alluviaux, sableux, issus de dépôts alluvionnaires.

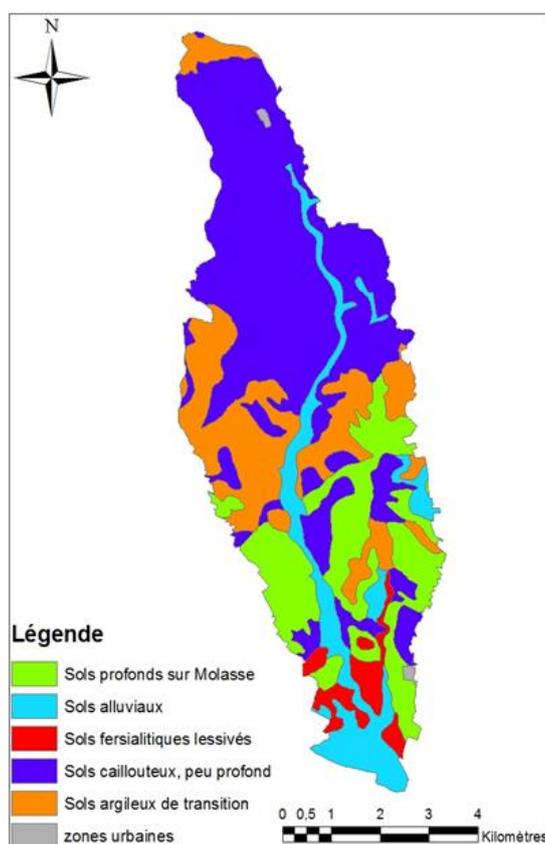


Figure 5: Distribution des sols dans le bassin versant du Rieutort

1.2 Contraintes hydriques et limitations des choix d'entretien du sol : Etude préalable

Les modalités d'entretien du sol modifient de façon importante la dynamique de l'eau dans le sol, et en corollaire impactent les performances agronomiques de la vigne. De fait, la crainte d'une concurrence hydrique excessive est le premier frein au développement de l'enherbement dans les vignobles méditerranéens malgré les avantages environnementaux aujourd'hui bien connus de cette

pratique. Il est donc important de prendre en compte les contraintes du milieu dans la démarche de répartition spatiale des pratiques afin d'avoir *in fine* des recommandations techniquement **acceptables** par les viticulteurs. C'est l'objet du travail présenté dans cette partie, qui repose sur les hypothèses suivantes :

- (i) l'enherbement est la technique d'entretien des sols la plus intéressante sur le plan environnement (lutte contre l'érosion, protection des sols, préservation de la qualité de l'eau etc.) : sur chaque parcelle, il s'agit de mettre en place ou de conserver une couverture végétale sur la surface la plus grande possible, et le plus longtemps possible ;
- (ii) l'enherbement engendre une concurrence hydrique vis-à-vis de la vigne qui est la principale contrainte de mise en place de cette pratique au vignoble ;
- (iii) dans un contexte climatique considéré comme constant à l'échelle du bassin versant, ce sont les différences de sol qui sont à l'origine de la variabilité spatiale des possibilités d'enherbement des parcelles viticoles.

1.2.1 Modalités d'entretien des sols et disponibilité en eau des sols pour la vigne

1.2.1.1 Les modalités d'entretien des sols influent sur la dynamique de l'eau dans le sol

Les modalités d'entretien des sols viticoles modifient la dynamique de l'eau dans le sol, en raison de deux mécanismes principaux :

- (i) la modification des capacités d'infiltration de l'eau dans le sol,
- (ii) la modification des flux d'évapotranspiration, en particulier en présence d'un couvert végétal fonctionnel.

a. La modification des capacités d'infiltration de l'eau dans le sol

Les capacités d'infiltration des eaux de pluies varient selon l'état de surface du sol (Tableau 2).

Tableau 2: Capacité d'infiltration des eaux de pluies selon l'état de surface du sol (Andrieux, 2006)

	Travaillé sans croûte	Cailloux	Travaillé avec croûte	Végétation herbacée	Litière	Sol nu avec croûte
Gamme d'infiltration (mm/h)	27 à 35	19 à 31	15 à 27	11 à 31	12 à 24	5 à 13
Capacité d'infiltration	Très forte	Forte	Forte	Moyenne à forte	Moyenne	Très faible à faible

L'état de surface du sol est lui-même sous la dépendance des interventions culturales d'entretien des sols. La présence d'un couvert végétal améliore la structure des horizons de surface, la porosité totale est plus importante. L'enherbement limite ainsi très significativement la destruction de la structure du sol et la formation d'une croûte en surface. Le chevelu racinaire favorise l'infiltration de l'eau dans le sol. De fait, un couvert végétal améliore l'efficacité des précipitations et l'infiltration par rapport à un sol nu non travaillé (Ludvigsen, 1987, in Chantelot et al., 2004 ; Andrieux, 2006). Dans un souci de préservation de la qualité de l'eau, l'enherbement a donc un effet positif en limitant les transferts par ruissellement des herbicides vers les eaux de surface (Andrieux et al., 2007).

b. Une évapotranspiration plus importante en modalité enherbée

L'alimentation hydrique de la vigne est fonction des ressources en eau du sol. En système enherbé, l'enherbement exploite un compartiment assez bien défini compris sous l'inter-rang et jusqu'à une profondeur variable selon l'espèce, les conditions du milieu et la conduite de ce couvert (Celette, 2007). La vigne, de son côté, peut potentiellement exploiter aussi bien le rang que l'inter-rang et à une profondeur très supérieure. L'enherbement conduit à un assèchement de l'inter-rang plus précoce et intense que dans le cadre d'une vigne désherbée (Celette et al., 2005). Sur un profil de sol vertical, l'enherbement entraîne un assèchement plus rapide des horizons superficiels du sol (Monteiro et Lopes, 2007). La présence d'un enherbement se traduit par une consommation en eau plus

importante au printemps (Monteiro et Lopes, 2007 ; Chantelot et al., 2004), par la suite l'assèchement du couvert végétal en été sous climat méditerranéen réduit considérablement la consommation en eau de l'enherbement (Figure 6).

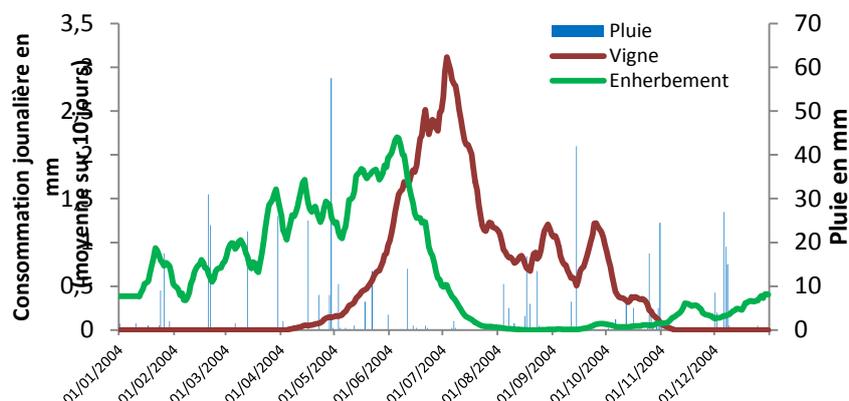


Figure 6: Consommations en eau de la vigne et de l'enherbement simulées par le modèle de bilan hydrique (climat méditerranéen, année 2004)

L'enherbement améliore la recharge hivernale en eau du sol, probablement en limitant le ruissellement (Celette et al., 2005), ce qui permet de compenser en partie une consommation en eau accrue du système au printemps. Malgré cette meilleure recharge, l'eau consommée au printemps par l'enherbement diminue généralement le stock en eau du sol disponible pour la vigne tout au long du cycle végétatif, en l'absence de pluie suffisante pour recharger le profil. La vigne exploite donc surtout le rang et les horizons plus profonds. La consommation en eau de l'herbe conduit donc à une réduction de la ressource eau disponible pour la vigne, et par conséquent à une contrainte hydrique subie par la vigne généralement plus importante. L'augmentation de la l'évapotranspiration d'une vigne enherbée a été estimée à 35% par Griebel (1996, in Lopes et al., 2004) en comparaison avec une vigne désherbée. Cette contrainte sur les ressources hydriques entraîne une diminution du développement végétatif de la vigne et des baisses de rendement. De fait, l'enherbement engendre aussi une contrainte sur les ressources minérales du sol, qui est un facteur supplémentaire de concurrence avec la vigne (Celette, 2007). Dans le travail de spatialisation qui suit, nous ne tiendrons pas compte des contraintes minérales exercées par un enherbement sur la vigne, pour les raisons suivantes.

- (i) les pratiques de fertilisation peuvent largement influencer sur le niveau des ressources minérales disponibles pour la vigne. Ces pratiques sont dépendantes des habitudes des vignerons pour lesquelles nous n'avons pas d'information spatialisée disponible ;
- (ii) les contraintes hydriques et minérales sont interdépendantes, et la présence d'une contrainte hydrique limite les besoins en azote de la vigne, diminue l'absorption racinaire, et affecte la minéralisation et la disponibilité de l'azote minéral du sol (Celette, 2007) ;
- (iii) en climat méditerranéen, la contrainte hydrique semble être le principal facteur explicatif du niveau de rendement de la vigne (Ramos et Martínez-Casasnovas, 2010 ; Guilpart et al., 2013).

Les modalités d'entretien des sols affectent la dynamique hydrique du sol et par conséquent les performances agronomiques de la vigne. La présence d'un couvert végétal se traduit par une contrainte sur les disponibilités en eau pouvant entraîner une réduction du développement végétatif et du rendement de la vigne.

1.2.1.2 Le type de sols peut atténuer ou aggraver les risques de contrainte hydrique pour la vigne

Le choix d'une modalité d'entretien des sols est largement conditionné par les disponibilités hydriques du milieu, notamment pour le maintien ou non d'un couvert végétal dans la parcelle en période végétative. De fait, les effets de l'enherbement sont plus importants dans les sols à faible réserve

utile, généralement plus superficiels (Chantelot et al., 2002). En sol profond, le système racinaire de la vigne peut se redéployer pour explorer et s'alimenter à partir des horizons de sol non colonisés par l'enherbement. Trois à quatre ans après l'implantation de l'enherbement, il est souvent observé un regain de vigueur et de rendement de la vigne (Figure 7). En sol superficiel, la concurrence reste plus marquée.

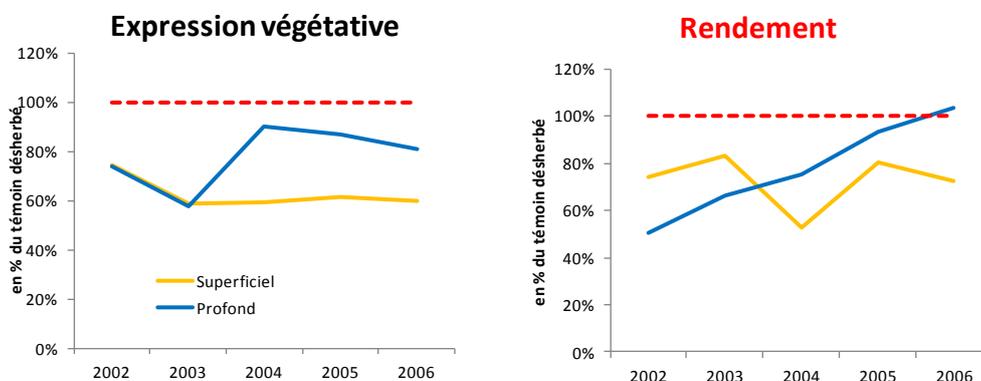


Figure 7: Impact de la profondeur de sol sur le niveau de concurrence de l'enherbement (Syrah, Languedoc-Roussillon). Source : CA34

De manière plus générale, au-delà de la simple profondeur du sol, c'est la capacité du sol à retenir l'eau et les nutriments qui est déterminante : les parcelles au sol sableux et/ou pauvre en matière organique seront plus sensibles à l'implantation d'un enherbement.

L'impact d'un couvert végétal sur la vigne est généralement moins marqué en sol profond qu'en sol superficiel : il existe donc des possibilités de modulation des modalités d'entretien des sols (recours plus ou moins important à un couvert végétal) en fonction des caractéristiques pédologiques des parcelles.

Les modalités d'entretien du sol jouent donc un rôle important dans les dynamiques hydriques du sol, et en corollaire sur les performances agronomiques de la vigne. De fait, la crainte d'une concurrence hydrique excessive est le premier frein au développement de l'enherbement dans les vignobles méditerranéens. Cette crainte se retrouve parmi les viticulteurs du bassin versant du Rieutort (Tindon, 2012) : « la plupart des viticulteurs du bassin ont conscience que des changements sont nécessaires mais n'envisagent pas toutes les alternatives au désherbage chimique de façon positive. Bien que le travail du sol de l'inter-rang et du rang soit en train de se généraliser, l'adoption de techniques d'enherbement des parcelles fait face à des réticences importantes. La crainte d'une perte de vigueur et de rendement est bien présente aux yeux des viticulteurs bien que les avantages agronomiques et environnementaux de cette technique aient été prouvés. »

D'un point de vue technique, il est nécessaire de répondre à la préoccupation principale des viticulteurs qui est la concurrence hydrique entre la vigne et le couvert végétal. L'objectif de notre travail dans le cadre du projet SP3A a été de proposer une analyse spatiale de l'aptitude des sols selon différentes modalités d'entretien des sols intégrant plus ou moins d'enherbement afin de proposer des choix techniquement acceptables par les viticulteurs.

1.2.2 L'analyse du risque de contrainte hydrique suivant les sols et les modalités d'entretien du sol

À partir de l'hypothèse que ce sont les dynamiques hydriques qui expliquent les différences de performances de la vigne, nous nous sommes basés sur un modèle de bilan hydrique du sol pour évaluer le comportement des sols du bassin versant. La démarche consiste à évaluer le risque de contrainte hydrique pour la vigne sur les différentes combinaisons de sols – modalités d'entretien du sol présentes sur le bassin versant du Rieutort. Nous avons choisi de réaliser une analyse fréquentielle du risque de contrainte hydrique à partir d'un modèle de bilan hydrique. Le modèle

WaLIS (Water baLance for Intercropped Systems) a été choisi pour sa capacité à simuler le bilan hydrique sur un système associant vigne et couvert enherbé (Celette et al., 2010). Il est décrit dans la partie 3 du rapport § 3.2.2. WaLIS permet de simuler quotidiennement la fraction d'eau disponible pour la vigne dans le sol (FTSW pour Fraction of Transpirable Soil Water). La FTSW est exprimée comme la quantité d'eau disponible au jour j divisée par la quantité maximale d'eau disponible que le sol peut stocker (ou TTSW pour Total Transpirable Soil Water). La FTSW reliée aux processus physiologiques de la vigne (Pellegrino et al., 2006), et de fait la FTSW est un indicateur du stress hydrique subi par la vigne.

1.2.2.1 Le paramétrage du modèle de bilan hydrique

Le modèle est paramétré de façon standard pour une vigne méditerranéenne palissée. Quand il est présent, le couvert végétal est considéré comme un couvert semé de type graminée pérenne (mélange ray-grass et fétuque rouge), selon le paramétrage utilisé par Celette (2007). Les autres paramètres d'entrée sont les modalités d'entretien des sols et les caractéristiques des sols sur le BV.

a. Les différentes modalités d'entretien des sols simulés

Le paramétrage d'une modalité d'entretien des sols dans WaLIS est fonction :

- (i) Du pourcentage de couverture du sol : dans toute la parcelle (100% enherbement), sur seulement les inter-rangs (60% de la parcelle), sur un rang sur deux (30% de la parcelle) ou encore l'absence d'enherbement (0%) ;
- (ii) De la période de présence de l'enherbement, avec des possibilités de destruction de l'herbe au printemps : dans ce cas l'enherbement est présent seulement pendant la période de repos végétatif ;
- (iii) Du type de désherbage utilisé (mécanique ou chimique) qui influe sur les capacités d'infiltration dans le sol des pluies.

Les différentes modalités d'entretien du sol simulées sont détaillées dans le Tableau 3.

Tableau 3: Les différentes modalités étudiées

Modalités d'entretien des sols	Abréviation
Enherbement complet permanent du rang (R) et de l'inter-rang (IR)	ENH100
Enherbement permanent tous les IR avec désherbage du R (équivalent à 60% d'enherbement de la parcelle)	ENH60
Enherbement permanent tous les IR avec travail du sol dans le R	ENH60TR
Enherbement hivernal tous les IR avec travail du sol dans le R, destruction du couvert le 1er avril. le sol est ensuite considéré comme travaillé.	ENH60H
Enherbement permanent un IR sur deux avec désherbage du R (30% d'enherbement)	ENH30
Enherbement permanent un IR sur deux avec travail du sol dans le R	ENH30TR
Enherbement hivernal un IR sur deux avec travail du sol dans le R	ENH30H
Sol travaillé complètement	TRAVAIL
Sol désherbé complètement	CHIM

b. Le paramétrage des sols du bassin versant

Les deux caractéristiques principales considérées pour chaque sol sont la TTSW et la capacité de ruissellement du sol. Ce sont les principaux paramètres qui influent sur les disponibilités en eau dans le sol simulés par WaLIS (analyse de sensibilité, résultats non présentés ici). Les informations pédologiques dont nous disposons sur le bassin versant du Rieutort ont été collectées par Cothenet et al. (2012). Sur cette base, nous avons utilisé les cartes pédologiques de l'Association Climatologique de l'Hérault afin de paramétrer WaLIS et de spatialiser les résultats. Les métadonnées de ces cartes précisent la texture et la profondeur de chaque unité de sol, métadonnées utilisées pour le paramétrage de WaLIS.

Paramétrage de la TTSW pour les différents sols du bassin versant

La TTSW est un paramètre difficile à mesurer (nécessité de sondes d'humidité du sol et d'un suivi régulier), qu'il nous est impossible d'échantillonner à l'échelle du bassin versant. Nous avons choisi de l'approximer par l'estimation de la réserve utile du sol (RU). La RU est l'eau disponible dans le sol entre l'humidité au point de flétrissement permanent et l'humidité au champ. Par simplification, nous ferons l'hypothèse que les racines de vigne sont en capacité de puiser dans l'ensemble du sol, et donc que la TTSW est équivalente à la RU. La RU peut être estimée par une fonction de pédotransfert simple proposée par l'INRA de Montpellier (Notice BDLR-RU, Ménard et al., INRA UMR LISAH).

$$RU = H \times TE \times (1 - (EG/100))$$

Avec RU : réserve utile (mm), H : épaisseur du sol (cm), TE : facteur ou indice de texture déterminé à partir de la classe de texture (%), EG : éléments grossiers (%).

L'utilisation de cette fonction de pédotransfert nous permet d'utiliser les métadonnées de la carte pédologique pour calculer la RU de chaque unité de sol du bassin versant (Figure 8).

Paramétrage du ruissellement pour les différents sols du bassin versant

WaLIS est un modèle qui estime le ruissellement, élément indispensable à l'élaboration du bilan hydrique, grâce à la méthodologie des Curve Number (USDA-NRCS, 2004). Le CN (curve number) définit la capacité d'infiltration d'un sol et donc sa propension au ruissellement. Il est construit à partir des caractéristiques hydrologiques du sol, selon son classement dans un des quatre grands groupes hydrologiques (NRCS, 2004), et de son état de surface (par exemple travaillé, non travaillé, enherbé).

Le groupe hydrologique de chaque sol a été estimé à partir de la texture de chaque unité de sol. La connaissance de la texture permet une évaluation du coefficient de conductivité hydraulique à saturation (Saxton, logiciel SPAW). Ce sont les valeurs du Ks qui vont nous servir à classer les sols dans des groupes hydrologiques distincts (National Engineering Handbook, 2007). Le classement des sols du bassin en grands groupes hydrologiques a abouti à la création de 3 grands ensembles de sols (A, B et C, le groupe D n'étant pas présent dans le bassin versant).

Des valeurs de CN en fonction des modalités d'entretien des sols sont affectées à ces trois grands groupes de sols, selon le Tableau 4 établi d'après la bibliographie (Manoliadis et al, 2003 ; Celette, 2007 ; NCRS-Engineering Field Handbook, 2007 ; Romero et al, 2007 ; Elhakeem et al, 2008).

Tableau 4: Valeurs de CN utilisées dans le paramétrage de WaLIS

Groupes hydrologiques				
États de surface	A	B	C	D
Sol nu	77	86	91	94
Sol travaillé	73	82	87	90
Sol enherbé	68	79	86	89

In fine, on obtient 13 types de sols en recoupant RU et groupes hydrologiques (Figure 8).

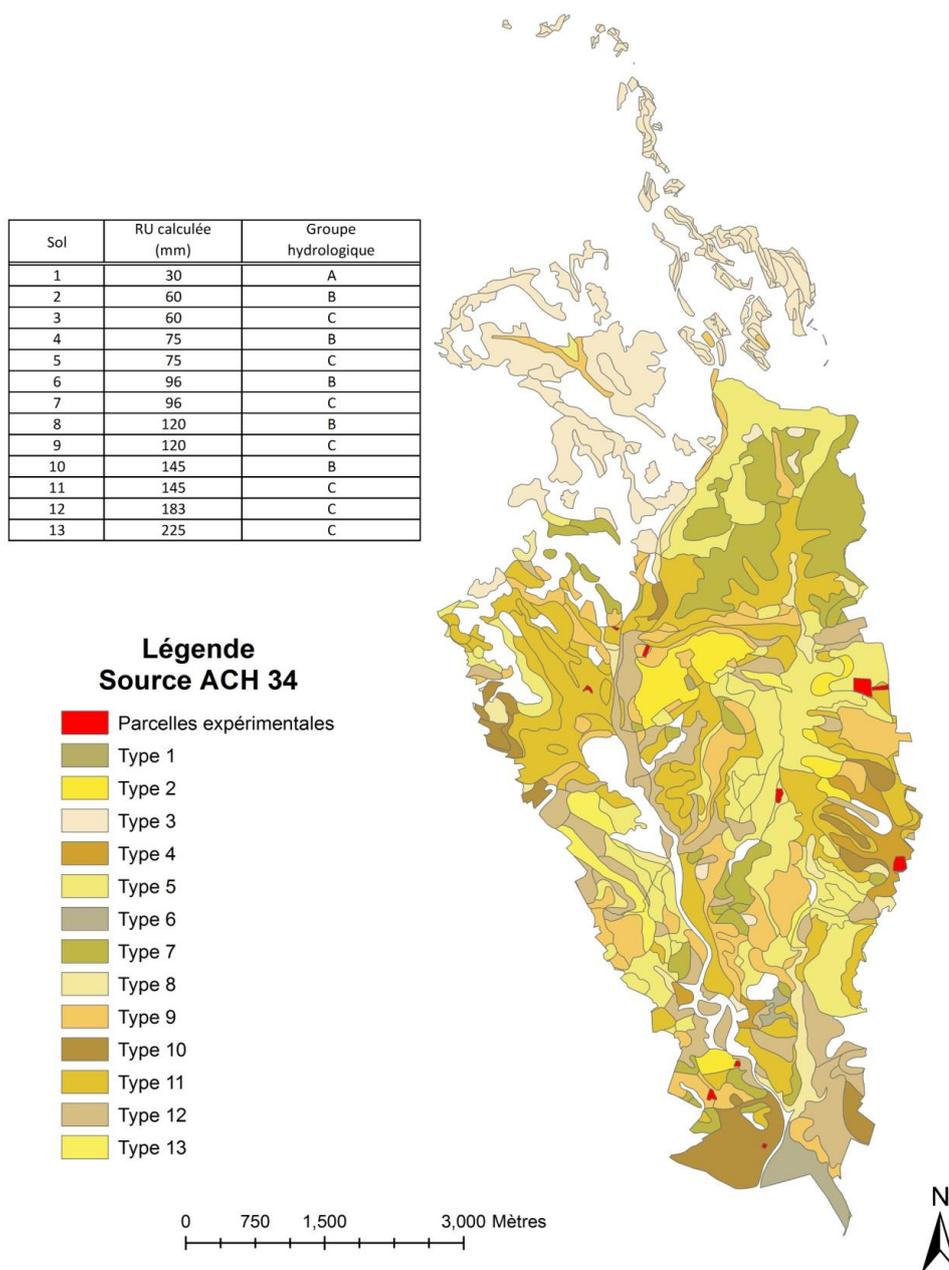


Figure 8: Cartographie des différents types de sol identifiés pour le paramétrage de WaLIS

c. La série climatique utilisée

Les données météo proviennent de la station météorologique de Roujan (ORE OMERE, UMR LISAH) située à 18 km à l’est de Murviel-lès-Béziers. Le jeu de données représente 18 ans de mesures quotidiennes (pluie, température moyenne et ETP) entre 1993 et 2008. Les quelques données manquantes sur la période ont été complétées par celles de la station météorologique de Puisserguier (INRA, UMR LISAH), située à 17 km à l’ouest de Murviel-lès-Béziers.

Ces données météo sont typiques de la région avec un climat méditerranéen fait d’étés très chauds et secs et d’hivers doux et humides. On peut observer une variabilité interannuelle importante des précipitations avec un maximum à 1600 mm et un minimum de 320 mm annuel (Tableau 5). Les années 2003, 2006 et 2009 ont été très chaudes et sèches (l’année 2003 étant l’année de la canicule). D’une année sur l’autre les conditions peuvent varier largement, excepté les années 2000, 2002, 2007 et 2008 qui semblent être des années relativement humides et chaudes.

Tableau 5 : Série climatique utilisée

Année	Pluie mm	Température °C	ETP mm
1993	935	14,0	945
1994	797	15,2	1011
1995	648	14,8	1058
1996	1600	14,2	928
1997	1025	15,0	941
1998	320	14,5	1037
1999	919	14,7	1022
2000	455	14,8	986
2001	734	14,8	1190
2002	657	15,0	1066
2003	770	15,2	1194
2004	572	14,5	1128
2005	552	14,2	1105
2006	465	15,1	1121
2007	512	14,9	1081
2008	710	14,4	1045
2009	517	15,2	1154
2010	552	13,9	1105
Moyenne	707,6	14,7	1062
C.V.	29%	2%	6%

Nous avons simulé le bilan hydrique des combinaisons de 9 modalités d’entretien des sols sur 13 types de sols, sur une série de 18 années climatiques, soit un total de 2 106 simulations annuelles. Ces simulations de bilan hydrique vont nous permettre de déterminer les risques de contrainte hydrique pour la vigne dans chaque situation, à l’aide d’un indicateur synthétique du risque.

1.2.2.2 Choix d’un indicateur synthétique de risque

Selon Pellegrino et al. (2006), la physiologie de la vigne est affectée en dessous de seuils minima de FTSW définis pour chaque étape du cycle de développement de la vigne (Tableau 6).

Tableau 6 : Seuils de contrainte hydrique et conséquences agronomiques (Pellegrino et al., 2006)

Indices	Stades phénologiques	Impact sur la vigne	Niveau de stress acceptable	Seuil de FTSW
FTSW1	Débourrement à Floraison	Développement végétatif	Léger	0.6
FTSW2	Floraison à véraison	Rendement	Léger à modéré	0.3
FTSW3	Véraison à récolte	Qualité	Modéré à Important	0.1
FTSW4	Récolte à chute des feuilles	Mise en réserve	Nul	0.8
FTSW5	Fin de dormance	Recharge hivernale	Nul	0.8

L’analyse de risque réalisée se base sur le nombre de jours par an où la FTSW passe en dessous des seuils définis dans le Tableau 6, correspondant à un nombre de jours de contrainte hydrique pour la vigne. Ces nombres de jours de stress (NBJSstress) sont calculés par période du cycle. Les périodes

du cycle végétatif les plus discriminantes pour séparer les modalités sont celles de débourrement à floraison et de floraison à véraison (Figure 9).

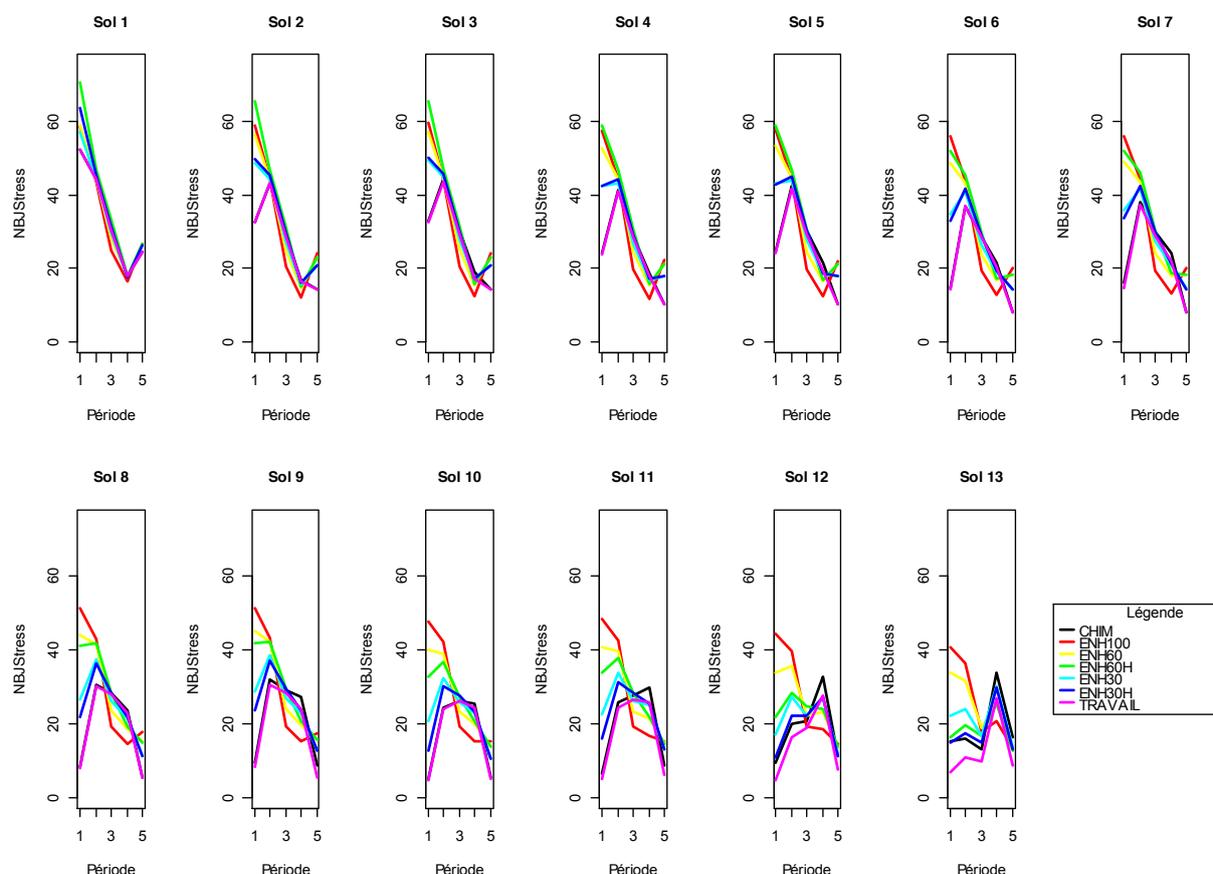


Figure 9 : Nombre de jours de stress annuel moyen en fonction des périodes du cycle de la vigne par type de sol et par pratique culturale

De plus, ce sont des périodes clés pour la vigne et l’élaboration du rendement (Ramos et Martínez-Casasnovas, 2010 ; Guilpart et al., 2013).

Nous avons choisi comme indicateur de risque le nombre de jours sous contrainte hydrique pour la vigne pendant la période débournement – véraison. Les jours sont comptabilisés en jours de stress dès que la disponibilité en eau dans le sol simulée devient inférieure au seuil de 60% de FTSW entre débournement et floraison (1er avril – 15 juin) et de 30% entre floraison et véraison (15 juin – 1er août).

1.2.3 Spatialisation du risque de contrainte à l’échelle du BV

1.2.3.1 Méthodologie de production des cartographies de risque sur le BV

Les simulations de bilan hydrique réalisées avec le modèle WaLIS ont permis de calculer un indicateur de stress, basé sur le nombre de jours où la disponibilité en eau du sol est inférieure à un seuil entre débournement et véraison, et ce pour chaque année de la série climatique étudiée. Pour établir un classement des risques de stress, la moyenne des jours de stress a été calculée sur les 18 ans pour chaque combinaison sol-modalité. L’étape suivante consiste à attribuer une classe de risque à chaque combinaison sol-modalité sur la base de cette moyenne de jours de stress. Ce classement a été réalisé en 6 groupes selon la méthode de Jenks (1967) de façon à réduire la variance intra-classe et à maximiser la variance inter classes. Le Tableau 7 résume les classes créées entre précisant les valeurs minimale, maximale et moyenne du nombre de jours de stress que l’on peut trouver dans chaque classe sur les différentes combinaisons sol-modalité concernées.

Le classement obtenu est relatif et graduel, ce qui permet un comparatif spatialisé des risques de contraintes hydriques liés à la mise en œuvre de différentes modalités d'entretien des sols. Les classes s'échelonnent d'un risque faible de stress hydrique (classe 1) à un risque très important de stress hydrique (classe 6).

Tableau 7 : Définition des classes de risques

Classes	Nombre de jours de stress par an		
	Minimum	Maximum	Moyenne
1	18	39	31
2	41	56	49
3	58	72	66
4	75	87	80
5	87	98	94
6	100	117	105

Ces résultats sont ensuite intégrés, via un logiciel de SIG, à la table attributaire de la carte des sols, et permettent d'établir des cartographies sur la base du classement de chaque unité de sol pour chaque modalité d'entretien des sols. La Figure 10 propose ainsi les cartographies des modalités « travail du sol complet » et « enherbement sur 60% de la parcelle ». La mise en place d'un enherbement permanent se traduit de facto par une augmentation significative du risque de contrainte hydrique quelle que soit la situation de la parcelle dans le bassin versant. Dans quelques zones toutefois, le risque de stress hydrique reste modéré (classe 3).

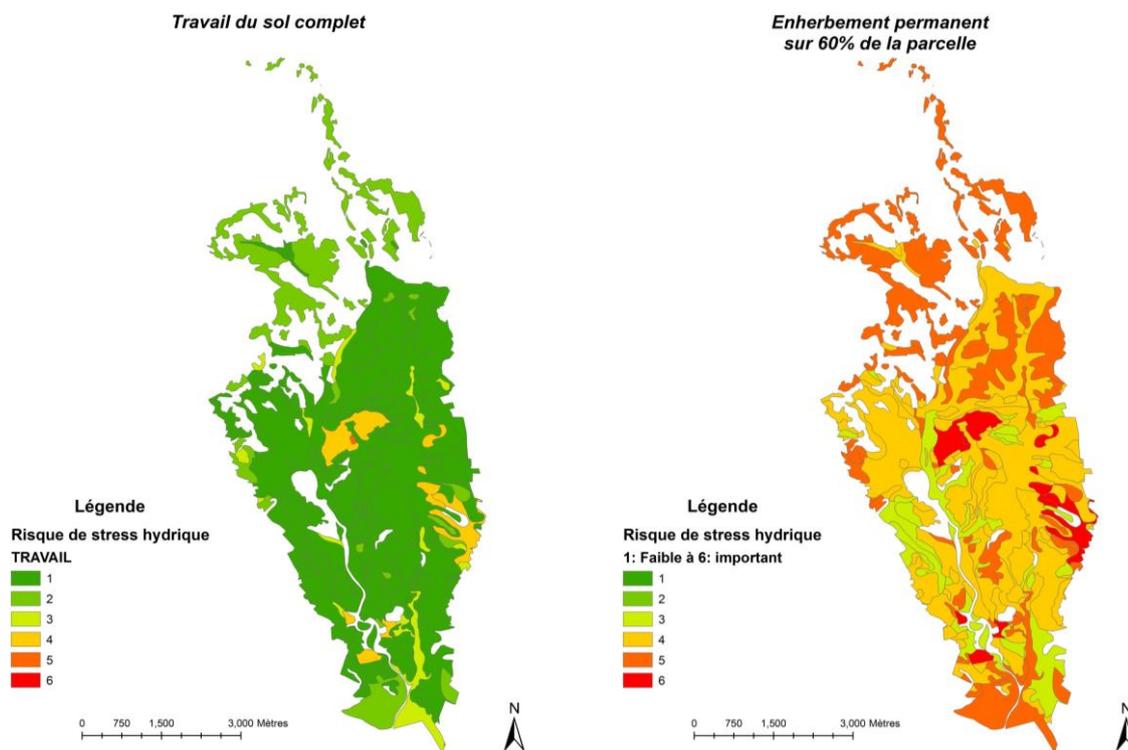


Figure 10: Cartographies d'aptitude pour le travail du sol intégral et pour un enherbement permanent sur 60% de la surface

1.2.3.2 Analyse des résultats et conséquences pour le raisonnement des pratiques culturales

Le nombre de jours de stress annuel est sous la dépendance principale de la modalité d'entretien du sol et de la réserve en eau utile (RU) du sol. Le type hydrologique n'est pas significatif.

De fait, le nombre de jour de stress diminue quand la réserve utile du sol augmente (Figure 11). L'effet de la modalité est aussi très discriminant, principalement en fonction du pourcentage d'enherbement.

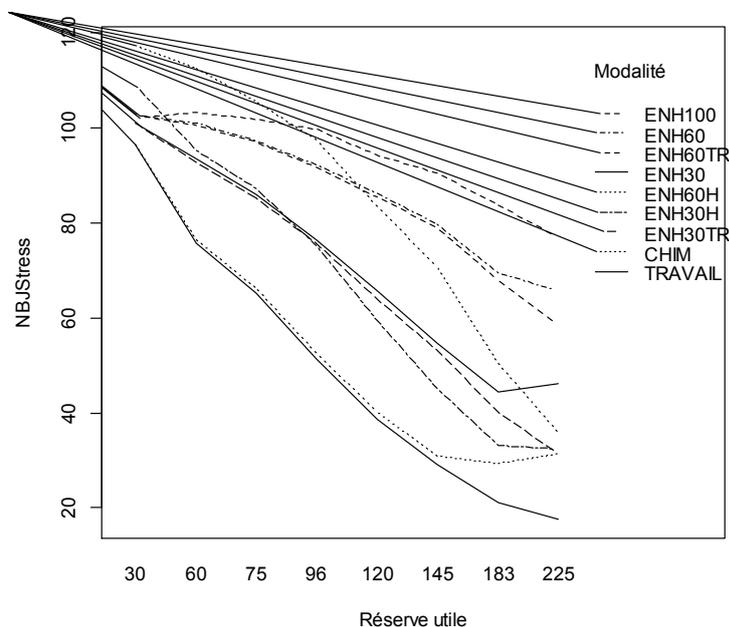


Figure 11: Nombre de jours de stress (NBJSStress) en fonction de la réserve utile par modalité d'entretien du sol

De fait, la classe de risque est plus élevée pour les sols superficiels et pour les modalités avec une importante surface enherbée (Figure 12).

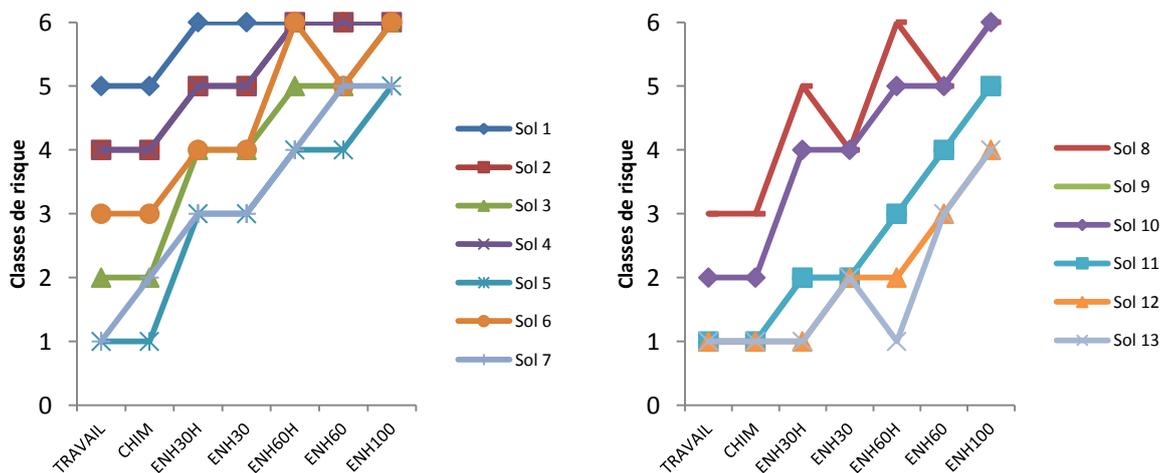


Figure 12: Évolution des classes de risque des sols en fonction des itinéraires techniques adoptés

Pour les sols aux réserves utiles les plus importantes (sols 12 et 13), la classe de risque reste modérée (classe 3) pour des enherbement permanent allant jusqu'à 60% de la surface du sol.

1.2.4 Discussion et conclusions

1.2.4.1 Des cartographies qui prennent en compte le milieu physique

Les cartographies proposées sont basées sur une approche de modélisation du risque de contrainte hydrique en fonction des différentes modalités d'entretien des sols. La qualité des cartographies dépend en grande partie de la qualité des simulations. Deux sources d'erreur peuvent être à l'origine d'erreur de simulations :

- (i) L'erreur intrinsèque au modèle, qui est fonction des équations du modèle
- (ii) L'erreur liée aux approximations sur les données d'entrée.

L'erreur intrinsèque est dépendante du modèle. On peut noter que le module de simulation du ruissellement, basé sur la méthodologie des « curve number », ne permet pas une simulation dynamique du changement des états de surface du sol. D'autre part, certains paramètres comme la compétition minérale, la recharge du stock d'eau provenant d'éventuelles remontées capillaires à partir de nappes de surface ne sont pas pris en compte par le modèle.

Une autre source d'erreurs provient des approximations réalisées lors du paramétrage du modèle. Suite à des expérimentations de terrain réalisées (résultats non présentés), nous avons constaté des écarts entre les paramètres estimés et mesurés (*i.e* entre RU et TTSW) en raison de la simplification nécessaire à une application à l'ensemble du bassin versant.

Le choix d'un paramétrage unique d'un enherbement à base de graminées ne reflète pas la variété des enherbements possibles sur le terrain : enherbement spontané, à base de légumineuse, association d'espèces...

La synthèse des simulations fait appel à un nombre de jours moyen de stress annuel. Cette approche ne permet pas de prendre en compte la variabilité annuelle, alors que sur le terrain, les viticulteurs peuvent mettre en œuvre une gestion adaptative des couverts en fonction des millésimes, comme par exemple décider de détruire plus ou moins précocement l'enherbement en fonction de la pluviométrie annuelle. L'absence de règles de décision établies et validées en climat méditerranéen ne nous a pas permis de prendre en compte ce type de pratique.

Enfin, lors de l'étape de spatialisation, la qualité de la cartographie des sols à la base de la spatialisation des résultats reste à préciser (échelle et précision des limites spatiales des sols).

Les cartographies illustrent nettement que l'introduction d'une part croissante d'enherbement dans les modalités d'entretien des sols se traduit par une augmentation du risque de contrainte hydrique pour la vigne. Cette accentuation de la contrainte hydrique subie par la vigne peut potentiellement affecter le niveau de rendement de la vigne et de fait le niveau de revenu du viticulteur, ce qui explique les freins importants pour l'adoption de ces techniques sur le terrain en climat méditerranéen.

Toutefois, les cartographies proposées représentent un risque relatif moyen, permettant une comparaison entre modalités d'entretien des sols sur le bassin versant. Elles ne sont pas basées sur l'acceptabilité du risque par les viticulteurs, qui est largement dépendante de chaque viticulteur. Un travail complémentaire sur ce volet serait utile pour appréhender le niveau de risque acceptable sur le bassin versant. Le faible recours à l'enherbement dans le bassin versant est toutefois un frein, car nous ne disposons pas d'un panel de viticulteurs suffisamment expérimentés sur cette technique.

In fine, les cartographies proposées dans ce travail constituent une première clé de lecture du paysage pour envisager une répartition des modalités d'entretien des sols techniquement acceptable pour les viticulteurs, mais ne peuvent en aucun cas se substituer à une connaissance fine des parcelles et à un appui technique pour conseiller les viticulteurs dans la mise en œuvre des techniques d'entretien des sols. L'acceptabilité effective par les viticulteurs est aussi fonction des autres contraintes régissant leurs choix techniques (matériels disponibles, objectifs de production etc.), mais aussi de leur motivations et freins (connaissance de la technique, exemple dans le voisinage etc.).

1.2.4.2 Conclusions

L'objectif du travail a été de créer une carte des risques de contrainte hydrique par type de sol et par modalité d'entretien des sols. L'évaluation du risque de stress hydrique a été basée sur des simulations de bilan hydrique à l'aide du modèle WaLIS (Celette et al, 2010), simulations réalisées pour chaque type de sol et pour différentes modalités d'entretien des sols. Le risque de stress hydrique est évalué en comptabilisant le nombre de jours de stress sur la période débourrement-véraison (1^{er} avril au 1^{er} août). Les jours sont comptabilisés en jours de stress dès que la disponibilité en eau dans le sol simulée devient inférieure au seuil de 60% de la réserve utile entre débourrement et floraison (1^{er} avril – 15 juin) et de 30% entre floraison et véraison (15 juin – 1^{er} août). Le classement a été réalisé ensuite sur la somme des jours de stress observés sur une série climatique de 18 années. Les classes de risque illustrent une gradation relative du risque selon les combinaisons de types de sols et de modalités d'entretien des sols, avec une augmentation du risque très largement sous la dépendance de la proportion d'enherbement dans la modalité d'entretien des sols. Les cartographies réalisées ont été utilisées dans la suite du projet pour proposer des *scenarii* de spatialisation des pratiques.

2 Caractéristiques socio techniques

2.1 Les structures d'exploitation et le parcellaire cultural viticole

Malgré un contexte de déprise de l'activité viticole dans la région, selon les données du recensement agricole de 2010 (<http://agreste.agriculture.gouv.fr>), la vigne représente en moyenne 86,4% de la Surface Agricole Utile (SAU) sur les quatre communes représentées sur le bassin.

Selon ces mêmes données, 171 exploitations déclarent leur siège sur l'une des quatre communes. Ces exploitations se répartissent 2 568 ha de SAU, pour une superficie moyenne de 15 ha, dont 13 ha de vigne. 40% des exploitations cultivent moins de 5 ha, et 27 % plus de 20 ha (Figure 13). En termes de superficie, les premières représentent 5% de la SAU et les secondes 68%.

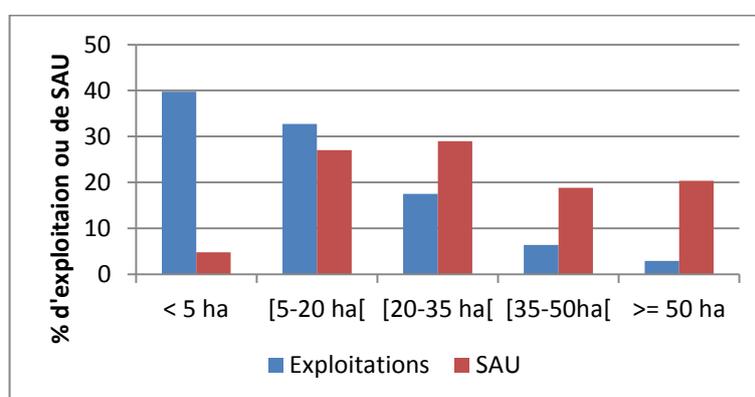


Figure 13: Répartition des exploitations et de la SAU par classe de superficie dans les communes de Murviel-lès-Béziers, Cabrerolles, St Nazaire de Ladarez et Causses-et-Veyran

Les principales caractéristiques du parcellaire cultural en vigne dans le bassin du Rieutort ont été obtenues en mobilisant le parcellaire cadastral, une orthophotographie de 2012 et Google Earth. Dans premier temps, le parcellaire cadastral en vigne a été reconstruit à l'aide d'un outil SIG en superposant et comparant visuellement le parcellaire cadastral et l'orthophotographie, puis en agrégeant et redécoupant certaines parcelles cadastrales de façon à ce que leurs contours se superposent au parcellaire viticole visible sur l'orthophotographie. Notamment, les parcelles cadastrales de vigne de taille inférieure à 1000m² ont été systématiquement agrégées aux parcelles voisines. Dans un deuxième temps, les vignes aux inter-rangs les plus étroits ont été repérés visuellement sur l'orthophotographie ou Google Earth.

Au total, 1742 parcelles de vigne ont été distinguées sur le bassin versant, représentant une superficie totale en vigne de 1463 ha. La caractéristique dominante de ces parcelles est leur petite taille : 72,5% des parcelles ont une superficie inférieure ou égale à 1 ha ; la superficie moyenne d'une parcelle est de 0,84 ha (Figure 14). Parmi ces 1774 parcelles de vigne, seulement 3,6% sont caractérisées par des inter-rangs très étroits (<= 1,6 m). Ces vignes représentent 3,2 % de la superficie en vigne du bassin versant.

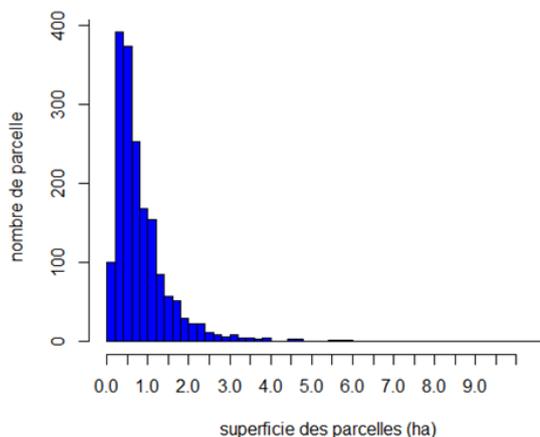


Figure 14: Distribution des classes de taille des parcelles de vigne dans le bassin du Rieutort

2.2 Etat des lieux des pratiques actuelles

2.2.1 Méthodes

L'identification des pratiques actuelles des agriculteurs (en matière d'entretien du sol) faisait partie intégrante d'un protocole d'enquêtes qui dépassait ce simple objectif. Dans un premier temps (première phase d'enquête à l'été 2012), l'analyse des pratiques fut combinée à un entretien visant à explorer les réseaux professionnels dans lesquels les agriculteurs sont insérés (voir résultats au § 2.3). Dans un second temps (deuxième phase d'enquête au printemps 2013), des informations supplémentaires sur les pratiques actuelles (et leur dynamique récente) furent collectées en association avec l'analyse des évolutions de pratiques envisagées et envisageables (voir résultats partie 3 § 2).

Pour échantillonner au mieux les agriculteurs à enquêter il était nécessaire de disposer d'une liste ou mieux encore d'une base de données. Pour cela nous nous sommes appuyés sur les données fournies par l'animateur du bassin versant du Rieutort en charge d'accompagner les changements de pratiques des viticulteurs. Nous avons pu bénéficier de deux listings (avec noms et adresses) : un premier listing de 44 viticulteurs ayant contracté des Mesures Agro-environnementales (MAEt) et un deuxième de 193 viticulteurs « hors MAEt ». Les listings incluaient, de manière très partielle, des informations sur le positionnement géographique au regard de deux bassins versants voisins (le Rieutord et le Taurou) et quelques rares précisions sur leur mode de production (surtout pour les individus en agriculture biologique), leurs responsabilités professionnelles (e.g., « membre du conseil d'administration de la cave coopérative de ... ») ou leur disponibilité (e.g., « très occupé, pas souvent présent »). À partir de ces listings, nous avons dressé une première liste de 42 viticulteurs ayant a priori des parcelles dans le BV du Rieutort (20 en MAEt et 22 hors MAEt). La liste finale des personnes enquêtées a été corrigée et complétée en fonction des actualisations d'informations opérées sur le terrain (personnes ayant cessés leur activité, informations erronées).

Lors de la première phase d'enquête, ce sont finalement 19 entretiens semi-directifs qui ont été réalisés, soit la moitié des viticulteurs encore en activité qui figurait sur la liste. Les observations

mentionnées sur les listings ont été prises en compte pour sélectionner un échantillon diversifié en termes de modes de production, modes de valorisation/vente, localisation sur le bassin versant et contractualisation MAEt (oui ou non). Dans les faits, la quasi-totalité des individus de la liste initiale (42) ont été appelés au téléphone. Les personnes non-enquêtées étaient soit absentes, soit trop occupées. Malgré nos précautions, Il peut exister quelques viticulteurs en activité et ayant des parcelles sur le bassin versant du Rieutort qui ne figuraient pas sur les listings, et dont nous n'avons pas entendu parler sur le terrain.

Les entretiens se sont déroulés en trois temps : i) un premier portait sur les caractéristiques de l'exploitation (SAU, forme juridique, productions), de l'exploitant (âge, formation, parcours, activités), sur le type de production (conventionnelle, biologique, raisonnée), la vinification (cave coopérative, cave particulière, catégories des vins, modes de vente), le vignoble (cépages, nombre d'hectares, caractéristiques du parcellaire), et la main d'œuvre ; ii) un deuxième temps se centrait sur les pratiques d'entretien du sol au vignoble et leur évolution récente ; iii) un troisième temps plus ouvert portait sur les dialogues techniques (relations avec d'autres viticulteurs, relations avec les techniciens, participation à des réunions, autres moyens d'informations ...). Deux supports annexes ont été utilisés avec le questionnaire : i) une carte du bassin versant montrant les limites communales, les cours d'eau et les parcelles, sur laquelle l'exploitant a été invité à indiquer la localisation de ses parcelles ; ii) un listing des viticulteurs du bassin versant, sur lequel l'exploitant a été invité à noter les personnes avec qui il échangeait régulièrement et/ou à le modifier s'il manquait des viticulteurs. Les entretiens étaient enregistrés et duraient entre 1 et 3 heures (90 min en général) ; si possible, ils se terminaient par un aperçu des outils d'entretien du sol et un bref tour de plaine dans une ou deux parcelles. Des comptes-rendus d'entretien ont été réalisés sur la base des notes prises sur les questionnaires, des photos, et des enregistrements. Il ne s'agit pas de transcriptions exhaustives, mais d'une présentation systématique de l'ensemble des données recueillies pour chaque entretien, auxquelles s'ajoutent un descriptif des observations faites sur place, amplement confortées par des citations afin d'illustrer le propos et le raisonnement du viticulteur. Dans un deuxième temps, un « réseau d'égo » des relations sociales de chaque viticulteur a été dessiné, en identifiant des liens forts et des liens faibles évoqués avec d'autres viticulteurs soit du BV du Rieutort (enquêtés ou pas), soit des BV limitrophes. Les données des réseaux d'égo ont alimenté une matrice, ce qui a permis, avec les logiciels Ucinet et Netdraw, de dessiner le réseau complet du BV.

Lors de la seconde phase d'enquête ce sont 12 viticulteurs supplémentaires qui furent interviewés. Ceux-ci furent principalement sélectionnés parce qu'ayant été cités comme étant en relation (professionnelle) avec les 19 personnes enquêtées lors de la première phase. La méthodologie d'enquête, lors de cette seconde phase, fut la même.

Au total ce sont donc 31 agriculteurs ayant l'essentiel de leur parcellaire viticole sur le bassin versant du Rieutort qui furent interviewés et dont on connaît donc à la fois les caractéristiques d'exploitation, les pratiques en matière d'entretien du sol et leur évolution récente. Les caractéristiques de ces exploitations ont pu être comparées avec les données statistiques AGRESTE 2010 pour les quatre villages situés dans le bassin versant du Rieutort (Murviel-lès-Béziers, St Nazaire de Ladarez, Causses-et-Veyran et Cabrerolles).

2.2.2 Résultats

2.2.2.1 Caractéristiques des exploitations agricoles enquêtées

L'échantillon de viticulteurs enquêtés apparaît plus jeune que la population décrite par AGRESTE : 30 % des agriculteurs ont moins de 40 ans et 10 % plus de 60 ans (contre respectivement 15 % et 30 % dans la statistique AGRESTE). La très grande majorité (80 %) des viticulteurs est originaire de la région avec une histoire familiale les rattachant à la viticulture. Cependant un nombre important (13/31) a connu un autre métier avant de s'installer agriculteur. Très peu sont pluri-actifs (4/31 seulement) et tous possèdent au moins un brevet d'aptitude professionnel agricole (11/31 ont un niveau de formation au moins égal à bac + 2).

L'échantillon est représenté par des exploitations de taille moyenne à élevée en comparaison de la population « moyenne » du bassin versant. 58 % des exploitations ont plus de 20 ha de vignes, pouvant atteindre 60 ha (contre 25 % selon AGRESTE) et 39 % ont entre 10 et 20 ha (une seule possède autour de 5 ha). Les exploitations avec moins de 5 ha de vignes n'étaient pas exclues a priori, mais il est vrai qu'elles sont plus difficiles à atteindre et de plus elles ne figuraient pas dans le listing mis à notre disposition.

Concernant les modes de commercialisation, l'échantillon est assez également distribué entre coopérateurs (18) et caves particulières (13). De même un certain équilibre est observé entre des exploitations tournées exclusivement vers la production de vins de « qualité » (AOP) avec des rendements compris entre 20 et 55 hl/ha, celles produisant des vins courants (vins de pays et de table) avec des rendements compris entre 60 et 110 hl/ha et les « mixtes » combinant les deux stratégies parce qu'exerçant leur activité sur deux types de terroirs (coteaux et plaine). S'il n'y a pas de lien entre la taille de l'exploitation et son orientation productive, par contre, les caves particulières sont plus fréquemment rencontrées dans le cadre des AOP stricts ; les coopérateurs se rencontrant plus souvent dans la production de vins courants (IGP et vins de table) ou en système mixte. Il existe également un lien entre le type de production et les différentes formes de labellisation environnementale : les agriculteurs en mode de production biologique sont présents dans les systèmes « vins de qualité » et mixtes (dans une moindre mesure) ; les systèmes mixtes sont également le siège de démarches de type « agriculture raisonnée ». Au total 8 exploitations agricoles sont engagés dans une certification environnementale officielle, ce qui n'empêche pas un nombre plus important (20 au total) de se revendiquer d'une forme d'agriculture « durable » (pour les non labellisés, parce qu'ils réduisent leurs intrants phytosanitaires).

14 agriculteurs ont souscrit des mesures agro-environnementales ; parmi ceux qui n'ont pas souscrit les raisons évoquées sont i) le fait d'être déjà en agriculture organique, ii) le manque de temps pour pouvoir pratiquer du désherbage non chimique sur le rang, iii) l'âge et la proximité de la cessation d'activité et iv) la lourdeur administrative. Pour notre échantillon cela représente une surface contractualisée de 150 ha (90 h en réduction d'usage d'herbicides, 50 ha en zéro herbicide et 10 en AB) pour un total d'environ 820 ha de surface viticole. En moyenne, dans les exploitations, la surface contractualisée est de 65 % de la surface viticole totale ; 5 fermes ont souscrit pour moins de 50 % de leur surface.

En conclusion on peut dire que :

a) les exploitations agricoles qui sont ciblées par l'opérateur visant à développer des pratiques environnementales dans le bassin versant du Rieutort sont, dans la très grande majorité des cas, des exploitations « professionnelles » où les agriculteurs exercent l'agriculture à titre principal et en tirent l'essentiel de leur revenu ;

b) ces exploitations agricoles sont assez représentatives du paysage viticole de la région.

2.2.2.2 Les pratiques courantes d'entretien des sols

S'il existe bien une diversité de pratiques d'entretien du sol, en général, les viticulteurs du bassin versant désherbent chimiquement sous le rang et labourent² l'inter-rang (sauf les « bio », bien entendu). Ce qui varie beaucoup plus est le nombre de « labours » dans l'inter-rang (et le type d'outil utilisé), suivi par l'intensité du désherbage chimique sous le rang (nombre de désherbages et types de produits utilisés) et la présence ou non d'un travail mécanique sous le rang (utilisation d'un outil intercep). Sous le rang, il semble exister une tendance à la réduction de l'usage des désherbants et l'adoption des outils intercep ; il demeure toutefois une diversité de points de vue sur l'efficacité de ce mode de gestion du rang. Une autre tendance, un peu moins marquée toutefois, est la réduction de l'intensité du travail du sol de l'inter-rang ; la majorité de agriculteurs s'exprime contre l'usage du rotovator et un certain nombre (4/31) ont récemment acheté ou pensent acheter un outil à disques.

² Le terme de « labour » est improprement utilisé pour signifier le travail du sol qui le plus souvent est réalisé au moyen d'outils à dents trainés, plus rarement des disques ou des rotovators.

Ce dernier prend la place du rotovator pour le travail de rattrapage dans une parcelle où les mauvaises herbes sont devenues trop grandes pour être maîtrisées avec un outil classique.

Si l'on différencie les pratiques à la parcelle sur la base d'une combinaison unique de modalités d'entretien dans le rang et dans l'inter-rang, en distinguant pour celles-ci i) traitement chimique versus travail du sol ou enherbement, ii) le nombre (moyen) de labours dans l'inter-rang, iii) le nombre (moyen) de désherbage mécanique sous le rang et iv) le type de désherbage chimique (pré et/ou post levée et nombre), on obtient 31 « itinéraires techniques » différents (dont 6 concernent les plantiers), soit autant que d'agriculteurs dans l'échantillon. Sur l'exploitation, un même agriculteur peut mettre en œuvre entre 1 et 4 types d'itinéraires techniques différents ; dans la majorité des cas un itinéraire technique unique est cependant présenté comme majoritaire.

a. Gestion de l'inter-rang : les pratiques du labour

Si l'on examine plus précisément les pratiques d'entretien de l'inter-rang, le nombre de passages d'outil le plus souvent cité est 2-3 et 3-4 (environ la moitié de l'échantillon) ; cependant, il existe à peu près autant d'agriculteurs citant un nombre de passages moindre (1 à 2) que d'exploitants en revendiquant plus (5-6 et jusqu'à 9). De fait, on rencontre, à parts quasi égales, des viticulteurs qui disent qu'il faut travailler le sol « le maximum possible » et d'autres qui indiquent qu'il faut le travailler « le moins possible ». Cette diversité d'attitudes s'exprime également dans le choix de labourer ou non après la vendange. Pour plusieurs enquêtés, le fait de ne pas labourer après la vendange est « primordial » pour favoriser une couverture herbacée hivernale ; d'autres déclarent qu'un labour après la vendange est essentiel pour que les parcelles soient propres pour les travaux d'hiver.

Le nombre total de passages et la décision de labourer ou pas après la vendange (on observe un lien entre ces deux variables) s'expliquent en partie par la localisation géographique et la topographie des parcelles concernées : ainsi les exploitants qui labourent le plus ont des parcelles dans la plaine, où à la fois la pousse d'herbe est importante et le sol se travaille facilement. A l'opposé, les exploitants qui évitent le labour ont des parcelles sur schiste et en pente, là où le risque d'érosion est très sérieux. Tout le monde s'accorde à dire que la pression de mauvaises herbes est plus importante dans la plaine que sur le plateau, et plus importante sur le plateau que sur les coteaux. Par ailleurs, les agriculteurs de la plaine ont en général la capacité d'irriguer, pratique qui favorise aussi la végétation spontanée. A côté de ces facteurs naturels, des considérations individuelles de « tolérance » à l'herbe jouent également un rôle mais notre étude ne peut en mesurer l'ampleur.

b. Gestion de l'inter-rang : les pratiques d'enherbement

La décision de réaliser ou non un labour après la vendange a, bien évidemment, des conséquences sur l'enherbement hivernal. La plupart des enquêtés s'accordent sur l'importance de « ne pas toucher » le sol en hiver afin de favoriser un enherbement hivernal naturel et ainsi d'éviter les ruissellements et l'érosion. La question est de savoir à partir de quel moment on doit laisser cet enherbement s'installer : pour certains, la période « sans labour » s'étire de juillet jusqu'à mars ou avril de l'année suivante ; pour d'autres, elle ne commence qu'en septembre. Ceci dit, la rapidité avec laquelle l'enherbement s'installe dans une parcelle est très variable selon le climat de l'année et la situation de la parcelle. Deux ou trois viticulteurs ont essayé de semer des espèces particulières (du ray-grass, des légumineuses), mais ils estiment tous cette pratique difficile : les semences coûtent chers et le succès (levée et installation) est incertain dans un climat sec et très variable.

Par contre, les viticulteurs enquêtés sont unanimes sur l'impossibilité de conduire un enherbement à la fin du printemps et en été. Plusieurs l'ont essayé, soit récemment, soit il y a quelques années (lorsque c'était encouragé), mais tout le monde est d'accord pour dire que cela ne fonctionne pas : en été la concurrence pour l'eau étant trop forte. Un autre problème est la concurrence entre l'enherbement semé et les espèces spontanées.

Certains agriculteurs tentent des pratiques « intermédiaires ». Pour éviter le risque d'érosion sur des parcelles schisteuses et en pente, un agriculteur évite le labour, préférant utiliser un girobroyeur dans l'inter-rang ou faire « un léger griffon » du sol ; dans les parcelles apparaît alors une végétation éparse

d'une hauteur de 30-40 cm, plus importante au milieu de l'inter-rang que sous les rangs, sans effet évident sur la vigueur des vignes. Un autre laisse pousser une graminée précoce au printemps puis passe avec un outil à disques quand elle a fini de grainer ; avec les disques, tout n'est pas enfoui et il reste alors un peu de végétation pour protéger le sol « contre un orage ». L'autre avantage est que la repousse de cette graminée est favorisée : « comme ça les années suivantes on favorise la graminée précoce et on obtient un enherbement maîtrisé assez rapidement ». Pour l'exploitant c'est aussi une manière d'ajouter de la matière organique aux parcelles. Cet agriculteur n'a jamais essayé de semer des espèces particulières, préférant faire confiance aux espèces spontanées, qui sont « mieux adaptées » au milieu.

c. Gestion du rang : une typologie basée sur l'intensité d'usage des herbicides

C'est dans la gestion du sol et des mauvaises herbes sous le rang que l'on constate de fortes différences dans l'utilisation des herbicides. Ces différences nous permettent de proposer une typologie des exploitations en fonction de leurs pratiques de désherbage sous le rang.

- Groupe 1 = les « bio » qui n'utilisent aucun herbicide (4/31).
- Groupe 2 = les « économes en herbicides » qui n'utilisent des herbicides que sur une petite partie de l'exploitation ou dans des situations (de sol et/ou de climat) exceptionnelles (6/31).
- Groupe 3 = les « standards » qui réalisent 1-2 passages d'herbicides sous le rang sur la majorité de l'exploitation avec uniquement du post levée sous forme de glyphosate (10/31).
- Groupe 4 = les « utilisateurs intensifs » qui ont recours au glyphosate et un produit anti-germinatif (11/31).

Groupe 1. Ce groupe inclut 4 exploitations totalement ou partiellement en agriculture biologique. L'outil intercep est passé (sous le rang) entre 1 à 3 fois par an selon les exploitations et les parcelles. Tous s'accordent sur le fait qu'il reste du travail à réaliser à la pioche en été (même s'ils n'arrivent pas toujours à l'accomplir). C'est parmi ce groupe qu'on entend le plus souvent l'argument selon lequel on n'élimine jamais l'herbe à 100 % ; le but étant seulement de la contenir de manière différenciée selon les situations « si la parcelle est un peu maigre, il vaut mieux qu'il n'y ait pas d'herbe du tout. Si elle est un peu plus vigoureuse, on peut se permettre de laisser un peu d'herbe. Sachant qu'il en reste toujours un peu parce que même là où je cherche à détruire l'herbe, ça fonctionne jamais à 100 % ».

Groupe 2. Si le 1er groupe inclut toutes les exploitations en agriculture biologique, le 2ème groupe est très hétérogène. Il inclut des exploitations (i) se revendiquant de l'agriculture biologique mais sans charte (ii) se revendiquant de l'agriculture raisonnée ou (iii) ayant souscrit des MAEt visant à réduire l'usage des désherbants sur leur exploitation. Il peut s'agir :

- d'agriculteurs se revendiquant, depuis longtemps, « proches du bio » et utilisant un outil intercep 1-2 fois par an sur la totalité de leur parcellaire, mais se réservant l'usage d'herbicides sur une petite surface résiduelle de vignes aux inter-rangs étroits (ou autre situation jugée difficile).

- d'agriculteurs en position de coteaux et sur sols schisteux avec une faible pression en mauvaises herbes ; ils n'utilisent les herbicides qu'après un printemps très pluvieux. Pour les situations « normales », un agriculteur dans ce cas utilise un girobroyeur en s'approchant le plus près possible des cep, et revient après avec une pioche selon besoin. Il n'a pas d'intercep et ne compte pas en acheter, mais il aimerait acquérir un girobroyeur permettant de s'approcher plus près des souches.

- d'agriculteurs s'engageant dans des MAEt « arrêt total des herbicides » sur une proportion importante (au moins les $\frac{3}{4}$) du parcellaire (en excluant les parcelles difficiles) ou d'agriculteurs s'engageant dans une MAEt « réduction des phytos » sur une partie majoritaire de leur vignoble et zéro herbicide sur une partie plus réduite (la partie la plus « facile »). Pour réduire les herbicides, ils n'utilisent qu'un désherbage de post émergence sur le rang et ont recours au travail du sol dans l'inter-rang.

Ici aussi on relève l'idée qu'il est illusoire de chercher à éliminer chaque herbe qui pousse dans les vignes. Pour ces agriculteurs, l'enjeu du travail du sol est autant la gestion de l'humidité du sol que le contrôle des mauvaises herbes. Ces agriculteurs évoquent les bénéfices fournis par la végétation

spontanée (protection des sols contre le ruissellement, alimentation et abri pour les insectes prédateurs) et opèrent une distinction entre les mauvaises herbes envahissantes et celles qui ne sont pas (sur les espèces non envahissantes, on peut ne pas intervenir). Il semblerait que ces viticulteurs ne sont pas en agriculture biologique pour se garder la possibilité d'utiliser des herbicides en cas de besoin.

Groupe 3. Ce groupe est le plus nombreux (10/31). Les exploitants réalisent 1-2 désherbages sous le rang avec uniquement du glyphosate sur la majorité de leurs parcelles. Certains associent en plus un désherbage en taches en 2ème ou 3ème passage. Ils n'utilisent cependant pas de produits de pré-levée (anti-germinatifs). Ceux qui se sont engagés dans une MAEt « réduction d'herbicides » sont limités à un seul passage (uniquement sous le rang et sans usage d'un produit de pré-levée) pour les hectares concernés (ils sont classés dans ce groupe lorsque leur contractualisation concerne une proportion restreinte de leur vignoble). Certains peuvent être également engagés dans une MAEt « arrêt total », mais pour quelques hectares seulement. Dans ce sens on peut dire qu'ils commencent à approcher les pratiques du groupe 2. Autrement dit, c'est dans ce groupe 3 qu'on a l'impression d'observer des « pratiques en transition ». On peut distinguer deux sous-groupes.

Groupe 3a : « désherbage standard + intercep » (ceux qui ont commencé une gestion mécanique de mauvaises herbes sous le rang sur une partie du vignoble, avec ou sans MAEt). Ils possèdent tous et commencent à travailler avec un outil intercep. Certains ont acquis l'outil sans engagement MAEt (utilisation de l'intercep parmi d'autres stratégies). Les pratiques de ces exploitants ne sont pas toujours bien stabilisées. Certains, plutôt que d'acheter un intercep, utilisent un « cadre » modifié, avec des ailes flottantes pour « chercher un peu entre les souches », d'autres avouent que pour l'instant ils ne trouvent pas le temps d'utiliser leur outil intercep.

Groupe 3b : « désherbage standard sans intercep » (ceux qui pratiquent un désherbage standard partout). Les viticulteurs réalisent tous 1-2 désherbages sous le rang avec uniquement du glyphosate, et ils ne possèdent pas d'intercep. Questionnés, ils expriment des doutes sur le fonctionnement, l'efficacité et/ou le coût d'un outil intercep ; mais en même temps, ils avouent que ils y viendront probablement.

Groupe 4. Ils utilisent un pré et un post-émergence et parfois du désherbage en tache sur une partie majoritaire de leurs vignes. Cela n'exclue pas qu'ils aient contracté des MAEt sur une partie de leur parcellaire. Ainsi, il est possible dans ce groupe de trouver des agriculteurs avec les pratiques les plus contrastées : des parcelles en mesure « zéro herbicide », des parcelles en réduction d'herbicides et dans la plus partie de l'exploitation du désherbage chimique intensif. Tous ces exploitants ont noté le besoin de varier le type de produits de pré-levée utilisés pour éviter le développement des résistances. Deux individus dans ce groupe (seuls dans l'échantillon) ont évoqué aussi l'idée que les problèmes de la qualité de l'eau sur le bassin versant viennent principalement de l'usage par « certains viticulteurs » d'herbicides très toxiques (la simazine, la terbuthylazine) interdits en France depuis plusieurs années mais encore disponibles en Espagne. Selon un de ces deux individus « l'État ferait mieux de subventionner l'achat des herbicides moins toxiques mais plus chers au lieu de financer des études sur les pratiques des agriculteurs ».

d. Variabilité, adaptation et organisation des pratiques dans l'exploitation.

La plupart des enquêtés déclarent qu'ils font « à peu près la même chose partout ». Cette réponse est étonnante vu le fait, déjà noté, que plusieurs, voire la majorité, des exploitants possèdent des parcelles avec des caractéristiques contrastées. Quand on questionne un peu plus sur ce point, ils précisent que les variations de pratiques selon les parcelles se manifestent dans l'organisation du travail : si l'on possède des parcelles « compliquées », on les travaille avant les autres, dans des conditions plus proche de l'optimum, sachant que sur d'autres parcelles, on aura un peu plus de souplesse. Dans cette veine, tout le monde souligne que dans le travail du sol, le « timing » est essentiel : c'est ce qui fait de l'adoption de l'intercep un défi, parce qu'il faut intégrer le travail sous le rang avec le travail de l'inter-rang, et le travail du sol avec les traitements phytosanitaires ; pour cela les herbicides offrent une marge de manœuvre plus importante.

Les enquêtés se montrent plus soucieux des effets de « remontée de l'humidité » occasionnés par le labour, qui peut augmenter la pression des maladies aux moments critiques, que des problèmes de portance posés par le besoin d'aller traiter sur des sols récemment labourés. Plusieurs disent laisser parfois un inter-rang sur deux non-labouré pour limiter ce dernier problème, même s'ils sont nombreux à reconnaître que celui-ci ne se pose pas trop souvent. Le besoin de traiter contre les maladies prime, les agriculteurs gèrent alors les deux programmes (entretien du sol et traitements phytosanitaires) indépendamment et corrigent les problèmes de tassement des sols, plus tard en saison. La question du tassement de sols se pose et attire des points de vue et des raisonnements très variés.

2.2.2.3 Relations entre pratiques, types de sol et caractéristiques des exploitations

Le positionnement cartographique des parcelles des exploitations enquêtées a été réalisé au moyen du logiciel QGIS. Aucune relation n'a pu être mise en évidence entre les types de pratiques (enherbement, désherbage mécanique, désherbage chimique et divers degrés d'intensité de recours aux produits) et les types de sol (les pentes cependant ne sont pas prises en compte). Les pratiques peu intensives en usage d'herbicides sont situées aussi bien sur les collines aux sols superficiels et caillouteux que dans les terres alluviales de plaines ; les parcelles à fort usage d'herbicides ne sont pas concentrées mais distribuées un peu partout dans le bassin versant. Par contre, les exploitations du groupe 4 sont en moyenne de taille supérieure aux autres (33 ha en moyenne dans ce groupe contre 20 à 25 ha de moyenne pour les autres groupes) ; dans ce groupe, les exploitants sont plutôt coopérateurs et en moyenne plus jeunes. A l'opposé les exploitations du groupe 1 sont toutes en cave particulière et les exploitants y sont en moyenne, plus âgés.

2.3 Etat des lieux du réseau de pairs – Les réseaux de dialogues

Analyser les réseaux de dialogue (Compagnone, 2014, p 320). « Dans la lignée des recherches de Granovetter (1973), des travaux ont été conduits, en agriculture, pour mettre au jour comment la structure (ou topologie) d'un réseau social peut avoir des conséquences importantes sur la dynamique de changements d'un collectif donné. En France, les premières études de ce type ont été déployées, dans les années 1980, par J.-P. Darré, R. Le Guen et B. Lémery (Darré *et al.*, 1989 ; Darré, 1991) dans le cadre d'une critique du paradigme épidémiologique sur lequel les organisations de développement agricole fondaient alors leurs actions. Ces études se sont centrées sur les réseaux de dialogues professionnels des agriculteurs à une échelle communale. Elles ont été prolongées dans les années 2000, par des travaux qui se sont intéressés à l'activité de production de connaissances et à la dynamique de changements dans des réseaux de viticulteurs (Compagnone, 2004 ; Chiffolleau, 2004 ; 2005), ou à la façon dont cette dynamique opère, non pas à l'échelle d'une commune, mais à celle d'un bassin versant (Houdart *et al.*, 2011). Au niveau international, on trouve une approche similaire dans des recherches menées ces dernières années dans les pays en voie de développement, dans le cadre d'une évaluation critique des démarches de développement financées par des organismes internationaux (White et Watkins, 2000 ; Hoang *et al.*, 2006 ; Isaac *et al.*, 2007).

Notre hypothèse générale est, dans le prolongement de ces travaux, que le réseau constitué par l'ensemble des échanges langagiers professionnels qu'entretiennent localement des agriculteurs, bien que pour partie jamais pensé en tant que tel par aucun d'entre eux, mais connu partiellement par chacun, a une influence sur la manière dont s'opèrent localement des changements de pratiques. La capacité des agriculteurs à s'impliquer largement, de manière maîtrisée, dans la mise en œuvre de pratiques alternatives à celles déployées jusqu'à présent est fortement liée à leur possibilité d'accéder à des ressources cognitives et sociales pertinentes, en s'inscrivant dans un espace local de dialogues professionnels sur les pratiques (Lazega, 1992 ; Zarifian, 1996 ; Darré, 1996). Ces dialogues peuvent être entretenus autant entre pairs qu'avec les agents de l'encadrement technique, c'est-à-dire les conseillers agricoles qui interviennent sur leurs exploitations. Ils permettent aux agriculteurs, dans un contexte de forte pression au changement et d'incertitude sur la validité des techniques alternatives, d'éprouver en continu la permanence et les modifications de leur espace d'action, c'est-à-dire d'apprécier la situation matérielle et sociale dans laquelle ils se trouvent, afin de juger ce qu'il est

possible de faire ou ce qui doit être fait et comment (Berger et Luckmann, 1986). Autrement dit, si le travail opéré dans la dynamique de changements a une dimension cognitive et pratique, il en a aussi une identitaire et normative (Becker, 1970 ; Darré, 1996 ; Lémery, 2003). »

2.3.1 Méthode

L'enquête sur les relations des individus a été menée conjointement à celle sur les pratiques. Il s'agissait de connaître les dialogues techniques entretenus avec d'autres viticulteurs, avec les techniciens et les moyens d'information utilisés.

Le but était de savoir comment et avec qui les exploitants discutent des questions viticoles, et en particulier des questions d'entretien du sol au vignoble. Dans la majorité des entretiens, nous avons été obligé d'élargir la question, « Avec qui échangez-vous sur les questions d'entretien du sol au vignoble ? » à une question plus large, « Avec qui échangez-vous sur les questions viticoles ? ».

Le « réseau personnel » ou "réseau d'ego" (Wellman, 2007) des relations sociales de chaque viticulteur a été dessiné, en différenciant les liens forts et les liens faibles (Granovetter, 1973) évoqués avec d'autres viticulteurs soit du BV du Rieutort (enquêtés ou pas), soit des BV limitrophes. Les données des réseaux d'égo ont alimenté une matrice, ce qui a permis, avec les logiciels Ucinet et Netdraw, de dessiner le "réseau complet" (Degenne et Forsé, 1999 ; Wellman, 2007) du BV (Figure 15).

Comme pour l'étude des pratiques ce travail s'est fait en deux phases : au cours d'une enquête menée par Laura Sayre (2012-2013) et d'une deuxième enquête réalisée dans le cadre du mémoire de fin d'études de Diane Chavassieux (2013). Comme les données de la première ont été reprises et complétées par la seconde nous nous attachons aux résultats de cette dernière.

2.3.2 Résultats

2.3.2.1 L'origine des liens

Les liens entre les individus trouvent leur origine dans des groupes formels auxquels ils peuvent participer, dans des groupes informels ou des rapports de voisinage.

Ces collectifs et associations ont été citées par les enquêtés en expliquant les liens forts et les liens faibles qu'ils y entretiennent : ce sont des structures qui donnent forme, en partie, aux réseaux schématisés. Il est difficile d'évaluer le rôle global de ces structures dans les réseaux de dialogues techniques qui existent sur le BV : l'échantillon inclût des viticulteurs qui n'ont cité que des liens "obligés" dans le cadre des structures formelles ou quasi-formelles (CUMA, groupe de LR, démarche PAM) ; des viticulteurs qui n'ont cité que des liens « libres » (des liens qu'ils entretiennent avec des « bons copains » ou des « connaissances » viticulteurs ; c'est-à-dire, des individus avec qui ils échangent sur les questions viticoles en dehors d'une structure particulière) ; et des viticulteurs qui ont cité les deux types de relations. Il est bien possible, pourtant, que parmi ces liens « libres », il y en ait qui se soient formés dans le cadre d'une association formelle antérieure.

Parmi les groupes formels il est intéressant, de noter que ce sont pour la plupart des associations petites et locales qui sont citées par les viticulteurs comme lieu où l'on peut échanger sur les pratiques.

On trouve:

- **Le groupe de lutte raisonnée** de Murviel, qui lie R2, R5, R15, R16, R18, et Rne2. R13 faisait partie de ce groupe, mais il n'en est plus.
- **Une démarche « plantes aromatiques et médicinales »** menée par la distillerie locale (réunions, plantations d'essai, recherche des moyens de valorisation). R2, R6, R12, R28 et Lne6 y participent. R1 n'est pas engagé dans ce type de production, mais il s'intéresse au projet et assiste aux réunions.

- **Une grande CUMA basée à Causses** : R8, R11, R19, R21, R23, R24, R25, R26 (parmi les enquêtés) en sont membres, ainsi que les non-enquêtés Rne3, Rne7, Rne8, Rne12, Rne14, Rne15, Rne16, Rne18, Rne19, Rne20, Rne 21, Lne20, Lne21, et Lne22. R19 en est le président. Il y a au moins deux interceps au sein de cette CUMA.
- **Une autre CUMA (machine à vendanger)** qui lie R11, Rn7, Rn8, Lne15, Lne16, Lne17.
- **Une petite CUMA** qui lie R7 et R14.
- **Le syndicat d'AOC St Chinian**. R20 (ancien président du syndicat) et R15 en sont membre.

En dehors de ce collectif, des viticulteurs citent **des rapports de voisinage**. On relève ce type de relation entre R2 et R18 ; entre R4 et R6 ; entre R5 et Rne1 ; entre R1 et R15 ; entre R9 et R13 ; entre R12 et R13 ; et entre R7 et R14. À noter qu'il y a d'autres voisinages observables sur la carte (entre R10 et R11, par exemple, ou entre R11 et R17) mais qui n'ont pas été exprimés comme liens. Il existe aussi une triade de viticulteurs qui se sont connus durant leur formation agricole (R10, R27, L9).

Quant aux relations de cave, elles ne semblent pas être non plus fortement déterminantes sur la structure des réseaux de dialogues techniques. Parmi les 15 administrateurs de la Cave Coopérative (CC) 8 ont été interviewés. Dans ce groupe, R19, R24 et Rne3 semblent être des personnes ressources sur lesquelles les autres s'appuient pour avoir des conseils, de l'aide ou des informations.

R5 est le seul viticulteur en Cave Coopérative dans le groupe de lutte raisonnée ; R8 (parmi d'autres) a souligné les fortes différences de raisonnement et point de vue entre ceux en Cave Particulière (CP) et ceux en Cave Coopérative. On observe toutefois de nombreux liens entretenus entre viticulteurs de ces deux types, et on relève aussi des liens entre des viticulteurs appartenant à la même cave, et entre ceux qui appartiennent à des caves différentes. Des viticulteurs qui sont actuellement dans les conseils d'administration ou des comités de contrôle des parcelles des Caves Coopératives ne citent pas forcément les relations qu'ils y entretiennent comme des dialogues techniques.

Les départs de cave ont, par contre, un impact perceptible sur les liens actuels. Un viticulteur note que depuis son départ de la Cave de Murviel, « on est un peu sur la touche... il y a des gens avec qui je discutais... et on ne discute plus ». Un autre distingue entre ceux qui sont partis « propres » (c'est-à-dire, à la fin de leur engagement) et ceux qui ont rompu leur contrat pour partir plus tôt. Les nouvelles relations de cave peuvent également prendre du temps pour se mettre en place.

2.3.2.2 La circulation de l'information

Les viticulteurs citent les technico-commerciaux de l'agrofourniture comme étant des appuis pour orienter leurs pratiques. Les viticulteurs s'appuient sur leurs recommandations pour les choix de produits de traitement et de maladies. Le conseiller de la cave coopérative est consulté pour la gestion des vignes et les droits de plantation. Un seul viticulteur R5 considère que les conseillers de la Chambre d'agriculture donnent des conseils utiles.

Un certain nombre de données apparaissent sur la disponibilité des informations et l'atmosphère d'échange qui règne sur le BV. Pour la plupart, les viticulteurs disent être « bien informés » : entre les journaux, les bulletins techniques, les formations et les techniciens le problème est plutôt de trouver le temps nécessaire pour tout utiliser. Néanmoins, quelques viticulteurs se plaignent de la difficulté à accéder aux informations nécessaires (R6, R14), ou disent être fatigué par des conseils techniques mal adaptés à leurs besoins (R8, R11).

2.3.2.3 Cas exemplaires

Prenons quelques cas exemplaires pour montrer comment les réseaux de dialogues techniques se construisent autour de chaque exploitation, afin d'avoir une idée de la diversité des postures socio-techniques qui existent sur le BV. On peut prendre un exemple pour chaque groupe de pratiques identifié dans la partie précédente, bien qu'il n'y ait pas de réseaux « typiques » pour chaque groupe.

- a) *R6* se caractérise comme un peu isolé à cause de son statut d'agriculteur biologique. Néanmoins il cite 6 liens forts et 10 liens faibles, dont 15 sont sur le BV du Rieutort et 1 sur le BV du Taurou

(nous avons parlé avec le propriétaire et le régisseur ; néanmoins le régisseur n'ajoute personne à la liste faite par son employeur). En retour, cette exploitation est citée par 7 des 18 autres enquêtés. Un viticulteur explique que le père du propriétaire actuel « était un précurseur dans la région » pour l'introduction des « cépages améliorateurs ». Ils participent à la démarche « plantes aromatiques » et se déclarent très intéressés par ce projet. Le domaine occupe une position centrale sur le plateau, au croisement de deux chemins principaux pour accéder aux parcelles des uns et des autres.

b) *R8* est aussi en cave privée, mais il n'est pas du milieu agricole ni de la région. Il cite 2 liens forts et 8 liens faibles, dont 8 sont sur le BV et 2 sur des BV limitrophes. Sa conduite du vignoble est informée par des études du sol qu'il a faites pendant sa formation BPREA, « avec une fosse de 2 m ... sur sol enherbé, sur sol désherbé intégral, sur sol labouré ». L'appui des techniciens était important pour lui au début de son activité, mais il ne les consulte plus. Quant aux collègues, il les divise entre ceux qui pensent à la vinification et ceux qui n'y connaissent rien. Ses deux meilleurs copains sont des vigneron innovateurs ; les deux sont en AOC St Chinian. L'un est en AB depuis 1992 (et maintenant aussi en biodynamie) et l'autre « a repris une grosse grosse partie de ses labours en chenillard.... c'est l'idéal ». Il est cité par *R5*, *R7* et *R19*.

c) *R13* échange beaucoup avec les viticulteurs du secteur parce qu'il gère une entreprise de « travaux agricole » avec son fils. Il cite 6 liens forts et 4 liens faibles, tous sur le BV. Il est cité par 6 personnes (*R4*, *R7*, *R9*, *R12*, *R16*, et *R18*). Il s'est retiré des comités et de conseils d'administration suite à de mauvaises expériences : « il y a trop de disputes. Je reste chez moi, j'ai un travail de vigneron, d'accord ? » Sa conception de ce travail est pragmatique : « Il y en a qui travaillent bien, il y en a d'autres qui font beaucoup plus. [X], par exemple [qui est un bon copain], il est toujours là, le matin, la nuit ; il faut pas exagérer non plus ! Ça sert pas à grande chose, je crois, d'être là ».

d) *R10* cite 4 liens forts et un lien faible, tous hors du BV. Pour lui, ses liens avec ces personnes sont très importants : ils se parlent presque tous les jours, travaillent souvent ensemble, discutent tous les aspects de la conduite du vignoble. Tous sont des copains de sa formation BPA. Deux « sont en AOC, moins de récolte mais c'est payé plus cher » ; un a « des terres riches... comme ici » ; le 4^e « un mélange des deux » ; donc ils sont tous égaux. Il se méfie des techniciens, qui prônent des stratégies de qualité qu'il trouve mal adaptées à sa situation : « Ils ne servent à rien du tout, ils connaissent même moins que moi, j'ai souvent l'impression ». En même temps il dit que « l'idéal, ce serait d'avoir 2-3 ha et de faire tout à la main. C'est beaucoup mieux. Mais on ne peut pas, on ne vit pas ». Il est cité par deux autres enquêtés, *R4* et *R6*.

e) *R5* n'est pas de la région ni du milieu agricole, mais il semble doté d'une forte personnalité. Il cite sur le BV 7 liens forts et 5 liens faibles, et il est cité par 9 autres enquêtés (*R2*, *R4*, *R8*, *R9*, *R11*, *R13*, *R15*, *R16*, et *R18*). Il est dans le groupe de lutte raisonnée, très important pour lui, mais il dit aussi parler de la viticulture « avec n'importe qui. Je ne suis pas sectaire ». Il fait appel aux techniciens quand il a un problème : « Comme le secteur viticole est très vaste, on ne saura jamais tout, donc c'est bien ». Il note aussi qu'à la CC de Roquebrun, il y a une obligation « s'investir dans la vie de la cave... sinon on est sanctionné financièrement. Ce qui est bien parce que nous les français, si on n'est pas obligés... ». Même s'il est dans le groupe « désherbage fort », il s'intéresse à l'usage des disques et des interceps qui se développe.

2.3.2.4 Le réseau complet

Le réseau complet (Figure 15) des interrelations entre viticulteurs a été construit sous la forme d'un sociogramme. On y différencie : les liens forts (relations intenses et fréquentes) des liens faibles (relations peu intenses et peu fréquentes) ; les viticulteurs interviewés en cave coopérative (carrés) de ceux en cave individuelle (cercles) ; les viticulteurs interviewés de ceux cités mais non-enquêtés dans le BV (triangle point en l'air) ou un BV limitrophe (triangle pointe en bas) ; les niveaux d'utilisation d'herbicides selon la typologie des pratiques réalisées (vert: zéro herbicide, jaune: faible usage d'herbicide, bleu: usage standard, rouge: usage important d'herbicide).

Ce qu'on constate tout d'abord sur l'ensemble du réseau est qu'il y a des liens forts, divers et multiples qui existent sur le BV et ses alentours, ce qui est peu surprenant sur un terrain assez restreint et dominé par la viticulture depuis longtemps. La plupart des viticulteurs se connaissent – un fait qui a été confirmé dans les entretiens et qui rend plus significative la sélectivité des liens cités. Sur un total de 302 liens cités, il ya 114 liens forts et 188 liens faibles. On compte 217 liens entre les viticulteurs du BV du Rieutort dont 49 n'ont pas été enquêtés. Seulement 30 liens cités avec des viticulteurs sur des BV limitrophes. On observe aussi une grande diversité des niveaux d'implication, avec des individus assez isolés (par exemple, R14, qui habite à Paris, et R17, qui vient de s'installer avec sa famille sur un grand domaine racheté; L23) et des individus centraux (R4, qui gère une firme d'agrofourniture ; R19, qui est président d'une grande CUMA ; R6 et R18, qui occupent tous les deux des grands domaines situés au cœur du BV et de la commune de Murviel).

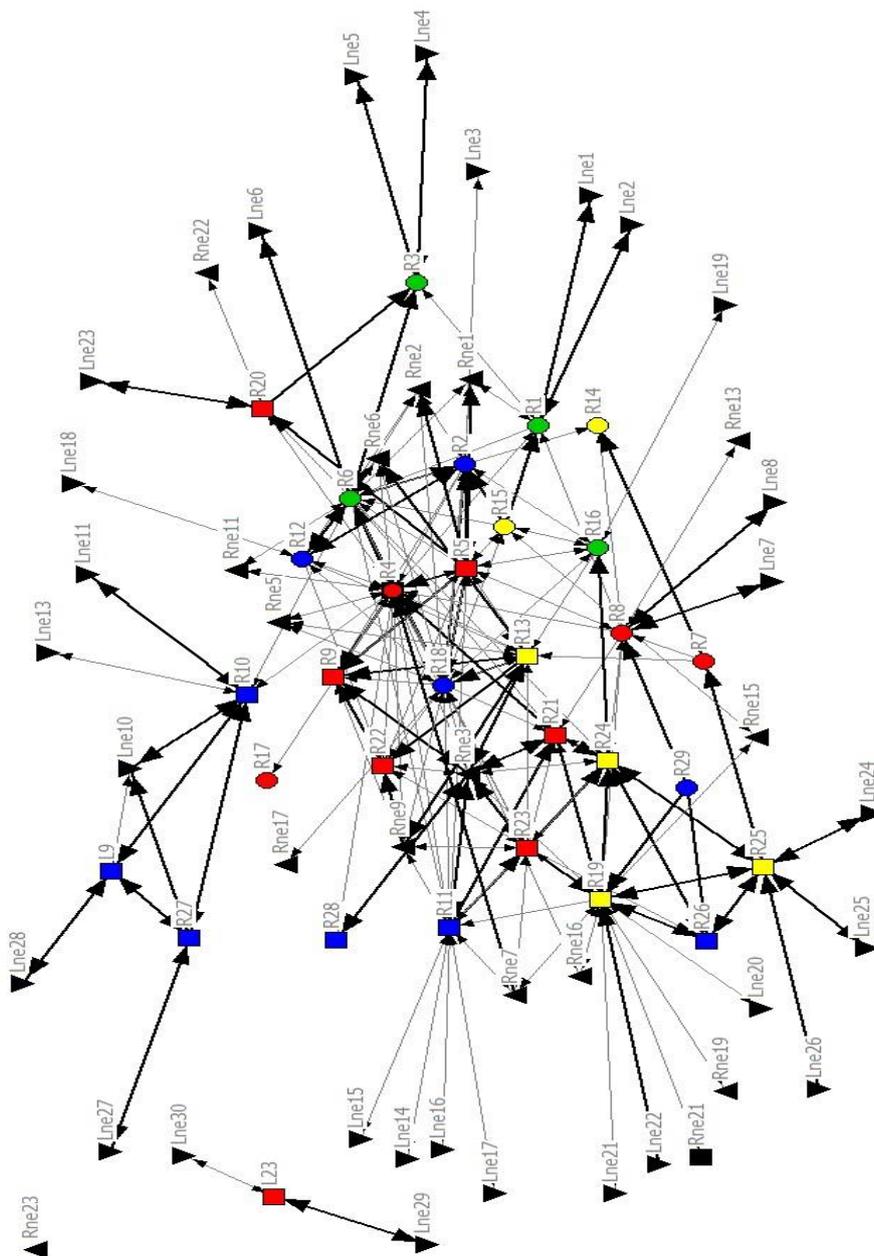


Figure 15: liens dialogiques entre les viticulteurs du BV

Le logiciel Ucinet © permet de calculer des indicateurs de centralité des individus. Les centralités de "degré" (nombre de liens d'un individu dans l'ensemble du réseau), d'"intermédierité" (pour apprécier

l'importance de la position dans la connexion de cliques entre elles) et « d'eigenvector » (dans un réseau centralisé permet de mesurer les individus les plus fortement interconnectés et ceux qui le sont moins par rapport à ces premiers).

2.3.2.5 Types de position dans le réseau

Trois positions des viticulteurs peuvent être distinguées : le noyau du réseau, la première périphérie et la seconde périphérie (Tableau 8).

Tableau 8: la position des viticulteurs dans le réseau

	heart of the network	the first periphery	the second periphery
farmers	R2, R4, R5, R6, R9, R11, R12, R13, R18, R19, R21 R22, R23, R24, Rne3, Rne9.	R1, R3, R7, R8, R10, R14, R15, R16, R17, R20, R25, R26, R28, R29, Rne1, Rne5, Rne7, Rne11, Rne16, Rne17, Rne2, Rne6, Rne1.	Rne13, Rne15, Rne19, Rne21, Rne22, Lne1, Lne2, Lne3, Lne4, Lne5, Lne6, Lne7, Lne8, Lne10, Lne11, Lne13, Lne14, Lne15, Lne16, Lne17, Lne18, Lne19, Lne20, Lne21, Lne22, Lne23, Lne24, Lne25, Lne26, Lne27, Lne28, Lne29, Lne30.
cliques	R4, R5, R9, R13, R18, R22; R4, R9, R13, R18, R22, Rne3; R4, R9, R13, R18, R22, Rne9; R4, R12, R13, R18, R22; R4, R13, R18, R22, R23, Rne3; R4, R13, R18, R22, R23, Rne9; R4, R5, R6, R11, R18; R4, R6, R11, R18, R21; R2, R4, R6, R12, R18; R2, R4, R5, R6, R18; R4, R11, R18, R21, R23, Rne3; R4, R11, R18, R23, Rne9; R2, R4, R5, R9, R18.	R7, R8, R14.	L9, Lne10, R27.

Le noyau du réseau. Les viticulteurs du noyau sont fortement intégrés dans le réseau et connectés aux autres viticulteurs. Leur centralité d'eigenvector est supérieure à 30. Ces 16 viticulteurs sont centraux dans le réseau. Dans ce groupe, R4, R6 and R19 ont une centralité de degré élevée (R4=31; R6=26 and R19=23). Ils ont donc le plus grand nombre de relations avec les autres, principalement au sein du noyau, et une grande "intermédiation" (R4=23; R6=22 and R19=17). Ils connectent fortement les cliques - c'est-à-dire des groupes d'individus fortement interconnectés - entre elles. Ce qui leur donne un rôle important dans la transmission des informations. Ils jouent le rôle de relais. Les deux autres viticulteurs centraux sont ensuite R11, R18 qui ont les centralités de degré les plus hautes.

Les viticulteurs avec le plus grand nombre de liens sont en position favorable pour plusieurs raisons ; (1) ils sont moins dépendants d'individus particuliers, (2) ils peuvent être la source d'informations pour beaucoup de viticulteurs du réseau et (3) ce sont souvent les négociateurs dans les échanges avec les autres. Toutefois ce sont ceux en position d'intermédiation qui apparaissent comme des leaders d'opinion par leur capacité à s'appuyer sur des informations nouvelles (Valente et Fujimoto, 2010).

13 cliques sont observées dans ce groupe. Les cliques favorisent la diffusion de l'information. R4 est inclus dans beaucoup de cliques de par son travail (directeur de la société de produit phytosanitaire dominante sur le bassin versant) qui l'amène à rencontrer et discuter avec beaucoup d'autres viticulteurs.

La première périphérie. Les viticulteurs sont moins intégrés au réseau. Ils ont des liens avec des viticulteurs du noyau et avec ceux de la seconde périphérie. Seule une clique sous la forme d'une triade a été observée entre R7, R8 et R14. R10 a une position spéciale car il fait le 'pont' entre le cœur du réseau et la dernière périphérie. Il peut être qualifié d'amplificateur, la diffusion d'une information entre ces deux groupes est dépendante de lui.

La seconde périphérie. Elles est constituées principalement de viticulteurs non enquêtés mais pas uniquement. Comme ils n'ont pas été enquêtés, ils peuvent uniquement être cités par les autres viticulteurs mais leur propre réseau d'égo est inconnu. Dans ce groupe, une triade a été identifiée entre R27, Lne10 et L9. Ils sont rattachés au centre du réseau uniquement par R10. L23 est complètement isolé du réseau. Ce qui s'explique par le fait qu'il est excentré géographiquement des autres viticulteurs, il habite à Béziers et ses parcelles ne sont pas sur le bassin versant du Rieutort.

2.3.2.6 Liens entre le type de position et le type de pratiques

Le noyau du réseau est constitué principalement par des viticulteurs du groupe 'désherbage fort' (55%). 6 d'entre eux (sur 16) sont des membres du conseil d'administration de la cave coopérative de Murviel-lès-Béziers et sont membres de la grande CUMA à Causses-et-Veyran (R21, Rne3, R11, R19, R23 and R24). 3 ont engagé des MAEt (R21, R19 and R24). Ils ne sont donc pas complètement fermés aux changements de pratiques. Ce noyau étant le lieu où se définissent les normes pratiques locales, ce constat fait apparaître une norme encore très centrée sur l'usage des désherbants. Ainsi parmi les 5 viticulteurs les plus centraux, 3 sont des utilisateurs de désherbants. Toutefois les 2 autres font faiblement ou pas du tout usage de désherbants. Ce qui signifie que la norme dominante en matière d'entretien des sols se trouve concurrencée par les pratiques alternatives d'autres viticulteurs du noyau. Nous avons à faire à une norme en cours de modification, qui accepte des variantes. Ainsi le groupe des 'bio' est bien intégré dans le réseau social et ne représente pas un groupe isolé. Toutefois, ils sont principalement dans la première périphérie, excepté l'un d'entre eux R6. Trois d'entre eux (R1, R6, R3) forment une clique. Le groupe 'très peu d'herbicides', dominé par des viticulteurs plus vieux que la moyenne issus de milieu agricole, sont également répartis entre le cœur du réseau et la première périphérie. Certains de ces viticulteurs de ce groupe peuvent avoir une position importante pour diffuser l'information et peuvent démarrer un processus de réflexion sur une réduction de l'utilisation de l'herbicide. Il faut noter qu'ils sont, comme les bio, dans la même zone du réseau. Une triade est observée entre R19, R24 and R25. Ils appartiennent au même groupe de pratiques (groupe 2) et sont membres de la même coopérative (Murviel-lès-Béziers). La mise en œuvre d'alternatives à la norme dominante s'opère entre viticulteurs qui ont une certaine proximité dans leur position dans le réseau. Le groupe 'désherbage standard' qui est dominé par des viticulteurs avec une expérience professionnelle antérieure est principalement situé (60%) dans la première périphérie, cela veut dire qu'ils ne sont pas centraux dans la diffusion de l'information.

2.3.2.7 Conclusion

Cette approche du réseau de dialogues professionnels des viticulteurs du BV permet de situer la structure sociale présente et la position qu'occupent les agriculteurs en fonction de leurs pratiques. Elle donne des indications sur la dynamique de changements à l'œuvre et des renseignements sur les viticulteurs en position d'intermédiation et donc de leader d'opinion. Elle offre une base pour suivre la façon dont la dynamique de changements de pratiques va s'articuler avec une dynamique de changements de positions sociales.

Partie 3

Construction de modèles pour l'évaluation des stratégies candidates

1 Introduction

Nous présentons dans cette partie les différents outils de modélisation, développés et/ou utilisés dans le cadre du projet, pour évaluer les performances environnementales et agronomiques des stratégies candidates choisies (Figure 16). Deux services éco systémiques seront ainsi formellement évalués, un service environnemental, le ruissellement polluant à l'exutoire du bassin versant, et un service productif, les rendements potentiels sur des parcelles de vigne types.

Dans un premier temps, nous présentons un modèle de simulation des itinéraires techniques mis en œuvre dans des exploitations viticoles. Ce modèle, nommé Dhivine, simule les itinéraires techniques résultant des choix techniques des agriculteurs, en tenant compte de leurs contraintes de ressources. Puis sont présentés les modèle biophysiques qui utilisent les itinéraires techniques simulés pour en évaluer l'impact i) sur les évolutions des EdS et de leurs propriétés d'infiltration à l'échelle de la parcelle, ii) sur le fonctionnement hydrique et azoté et les rendements à l'échelle de la parcelle et iii) les flux d'eau de surface et les concentrations en herbicides à l'exutoire du bassin versant.

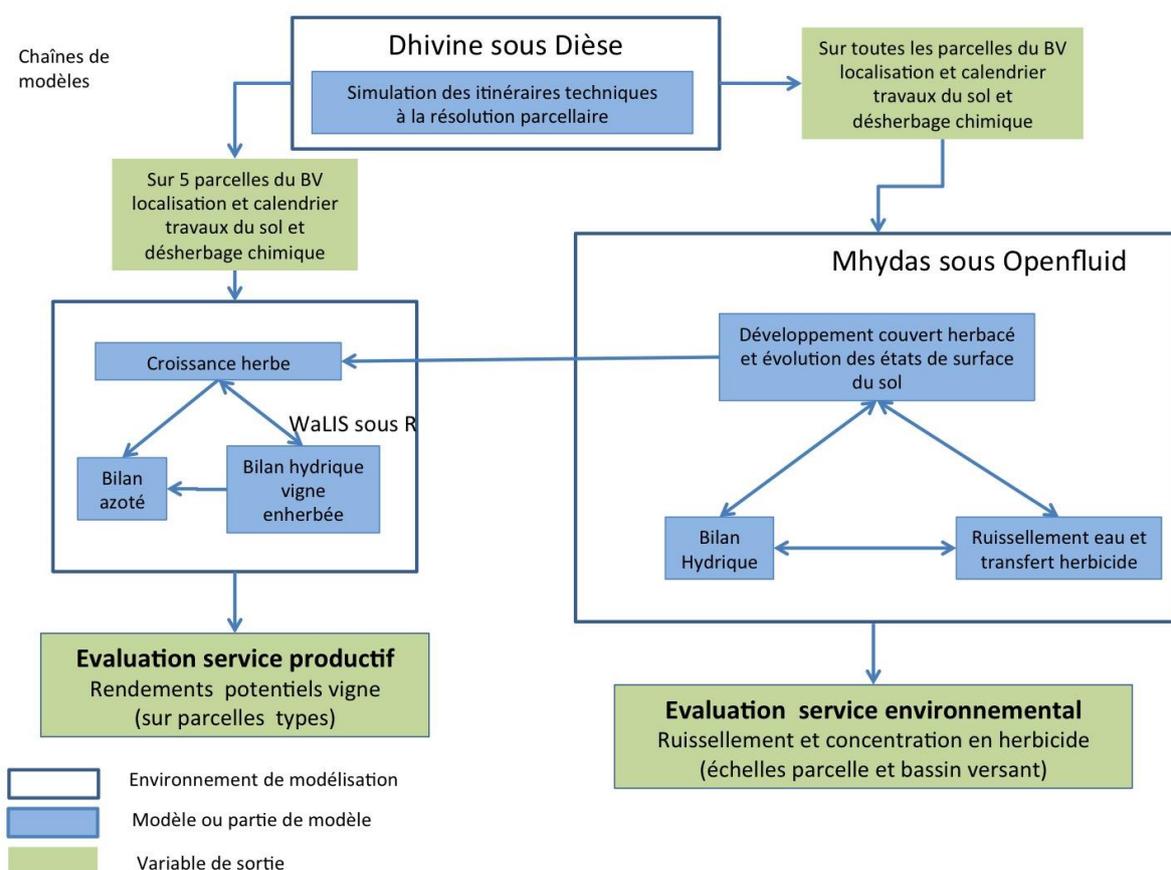


Figure 16: schéma général décrivant les chaînes de modèles utilisés pour l'évaluation des stratégies candidates

2 Simuler les itinéraires techniques résultants de la mise en œuvre de choix techniques et organisationnels dans une exploitation agricole

Nous présentons dans cette section un modèle de simulation des itinéraires techniques dans des exploitations viticoles du Sud de la France. Ce modèle a été construit à partir d'une connaissance sur la conduite du vignoble issue d'enquêtes auprès d'un échantillon de 54 viticulteurs de la plaine héraultaise (Paré, 2011). L'objectif du modèle, nommé Dhivine, est de simuler les itinéraires techniques viticoles à la résolution parcellaire, simultanément pour un ensemble d'exploitations, dans un contexte climatique et de pression phytosanitaire donné, en tenant compte des choix techniques des viticulteurs et de leurs contraintes de ressources

La modélisation s'appuie sur un cadre conceptuel classique pour les agronomes. Pour la modélisation des systèmes de culture on considère en effet que, compte-tenu de ses objectifs et de ses contraintes, l'agriculteur établit un plan d'action qu'il est capable d'adapter de façon plus ou moins anticipée en fonction des aléas, climatiques et de pression phytosanitaire par exemple, (Duru *et al.*, 1988 ; Aubry *et al.*, 1998a ; Martin-Clouaire & Rellier, 2011). Une année donnée, les itinéraires techniques sont le résultat de la mise en œuvre de ce plan et de son adaptation aux aléas. Dans Dhivine, un tel plan s'appuie sur des indicateurs dynamiques (par exemple, l'état des parcelles comme le stade phénologique de la vigne ou comme l'humidité du sol, l'avancement des travaux, le climat, etc.), s'applique aux parcelles regroupées en lots suivant certaines de leurs caractéristiques permanentes ou temporaires et met en jeu les ressources de l'exploitation avec leurs règles de partage entre travaux concurrents.

Après avoir présenté les concepts généraux qui sous-tendent l'ontologie des systèmes de production agricole associée la plateforme de modélisation choisie, nous nous attacherons à décrire comment ces concepts sont mobilisés dans le modèle Dhivine. Puis nous décrirons comment une simulation est initiée, puis lancée. Enfin, le modèle sera appliqué au cas d'une exploitation viticole pour simuler l'impact de différents choix techniques et organisationnels sur les itinéraires techniques d'entretien du sol (Martin-Clouaire *et al.*, soumis 2013).

2.1 Concepts généraux

Le modèle Dhivine s'appuie sur l'environnement de simulation DIESE (Discrete Event Simulation Environment, Martin-Clouaire & Rellier, 2009) et l'ontologie des systèmes de production agricoles (Martin-Clouaire & Rellier, 2011) qui lui est associée.

Dans cette ontologie les concepts d'entité, processus et évènement représentent respectivement les aspects structurel, fonctionnel et dynamique d'un système. Une entité décrit un objet (e.g. une plante, une parcelle, un tracteur), éventuellement abstrait (e.g. un système opérant (cf. infra)), dans le domaine d'intérêt. L'état du système à un moment donné est la valeur des propriétés des entités qu'il inclut (e.g. le stade phénologique des plantes). Un *processus* est la spécification d'une partie du comportement d'une entité (e.g. le processus de développement phénologique des plantes). Un processus provoque un changement d'état quand un évènement particulier arrive (ex. l'évènement d'élévation de la température de l'air). Par conséquent, les *évènements* contrôlent la temporalité des processus.

Pour les aspects de pilotage, 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, spécifie une opération à réaliser sur une entité biophysique (e.g. une parcelle, un rang ou un inter-rang) par un exécutant (e.g. un ouvrier ou un ensemble d'ouvriers). Une activité primitive est caractérisée par des *conditions d'ouverture et de fermeture qui déterminent respectivement à partir de quand l'activité peut être réalisée et à partir de quand elle ne le peut plus*. Ces conditions sont 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 au temps t . Chaque opération mobilise un équipement. Une opération est une action (par exemple, le travail du sol) qui mobilise un équipement (e.g. un tracteur et un cultivateur) et qui se traduit par une transformation intentionnelle de l'état du système biophysique. Cette action peut être instantanée ou se réaliser progressivement selon une *vitesse d'exécution*. L'exécution d'une opération est contrainte par des *conditions de faisabilité* en relation avec l'état du système biophysique (e.g. l'humidité du sol qui en détermine la travaillabilité).

Les activités peuvent 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 qui elles-mêmes peuvent recevoir des conditions d'ouverture et de fermeture. Toutes les activités sont ainsi connectées par des opérateurs à l'exception du plan d'activités qui représente le niveau d'activité le plus élevé.

Du fait notamment des conditions d'ouverture et de fermetures qui s'appliquent aux activités et des types d'opérateurs qui les unissent, un plan n'est pas une séquence d'activités complètement spécifiée à l'avance. C'est un guide à partir duquel les activités à exécuter, les entités concernées et les ressources mobilisées sont déterminées dynamiquement en cours de simulation en fonction des situations spécifiques rencontrées au moment où l'exécution est envisagée.

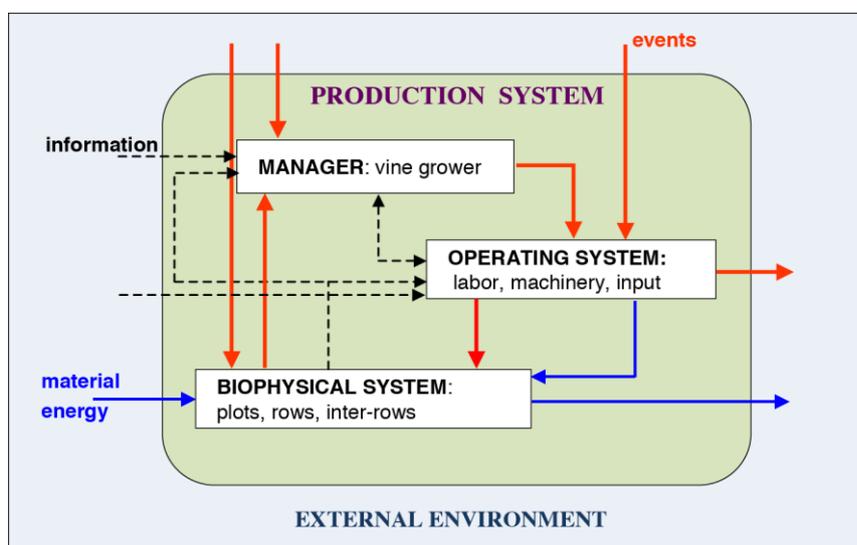


Figure 17: Un système de production viticole

Un système de production agricole (Figure 17) pour une application au cas d'une exploitation viticole) est conceptuellement une entité située dans et influencée par l'environnement extérieur (par exemple, le contexte climatique et économique). Il peut être divisé en trois sous-systèmes en interaction : le système de décision (représenté par le pilote ou gestionnaire de l'exploitation), le système opérant et le système piloté (ou système biophysique), qui sont des entités actives dans le sens où ils sont chacun le dépositaire de processus, ont des entrées, des sorties et un agenda d'événements.

Le système biophysique est composé d'entités biophysiques (e.g. des ceps de vigne, des parcelles) qui ont leurs propres processus (e.g. le processus de changement de stade phénologique). Parmi les évènements contrôlant ces processus se trouvent ceux résultant des opérations exécutées par le système opérant. Les processus biophysiques peuvent à leur tour générer des évènements déclenchés par des changements notables de l'état du système (e.g. un changement de stade phénologique peut générer un évènement qui déclenche l'ouverture d'un chantier (cf. infra)).

Le gestionnaire est la personne qui a la responsabilité de la réalisation de l'objectif global du système de production. Le gestionnaire dispose d'une stratégie de conduite, qui, dans Dhiveine, est un plan d'activités accompagné d'options de gestion. Les processus rattachés au pilote portent, entre autres,

sur (i) la mise à jour des activités en fonction de l'avancée du temps et des changements survenus ; (ii) l'extraction par lecture de la stratégie des jeux d'activités candidats à exécution (i) l'allocation des ressources en accord avec leur disponibilité et la sélection du jeu d'activités préféré parmi les jeux d'activités candidats à l'exécution.

Le système opérant est composé des ressources en matériel et main d'œuvre de l'exploitation. Il a en charge l'exécution du jeu choisi.

L'ontologie et le cadre DIESE qui l'implémente donnent la possibilité de représenter un ensemble de systèmes de production viticole indépendants et les simuler simultanément. Dans la suite du texte, nous nous attacherons à décrire comment le fonctionnement d'une exploitation agricole est représenté et simulé dans Dhivine.

2.2 Le modèle structurel : la représentation du système de production viticole

2.2.1 Le système piloté

Dans Dhivine, le système piloté est le vignoble de l'exploitation considéré comme un ensemble de parcelles. Une parcelle de vigne étant caractérisée par l'alternance de rangs et d'inter-rangs qui peuvent éventuellement être entretenus différemment, une parcelle est considérée comme la juxtaposition de trois types de zones : (i) une zone représentant les rangs ; (ii) une zone représentant les inter-rangs, dits « stabilisés » qui ne reçoivent jamais de travail du sol ; et (iii) une zone représentant les inter-rangs entretenus par travail du sol (exclusivement ou non).

L'espacement régulier des pieds de vigne est résumé par la distance entre deux rangs, et la distance entre deux ceps adjacents dans une rangée. La surface relative des rangs et des types d'inter-rangs est déterminée par deux paramètres principaux : r , le rapport de la largeur sous le rang à la largeur de l'inter-rang, et q , la fréquence des inter-rangs stabilisés (rapport du nombre d'inter-rangs stabilisés au nombre total d'inter-rangs). Une parcelle est localisée par sa longitude et sa latitude. Sur cette base, chaque parcelle est rattachée à la station météorologique la plus proche à vol d'oiseau, choisie parmi l'ensemble des stations utilisées pour décrire le climat. Sur chaque parcelle est installée une vigne caractérisée par sa variété et connue comme précoce ou tardive. La seule connaissance relative à un processus biophysique actuellement utilisée dans le modèle est le calendrier de changements de stade phénologique des variétés de vigne. Le processus de développement des vignes n'étant actuellement pas modélisé dans Dhivine, cette connaissance est issue de bases de données régionales et est incluse dans un fichier de données d'entrée des simulations.

2.2.2 Le système opérant

Les ressources en matériel et main d'œuvre sont constituées des équipements et des unités de main d'œuvre déclarées dans l'exploitation.

Les équipements sont décrits par leurs usages (e.g. matériel traction, matériel de travail du sol, matériel de broyage). Leur disponibilité est toujours vraie.

Les unités de main d'œuvre sont caractérisées par l'organisation de leur emploi, sous la forme d'un plan annuel d'emploi partitionné en saisons d'emploi. Pour chaque saison, on indique la limite supérieure du nombre d'heures de travail hebdomadaire et la structure de la semaine de travail : jours travaillés, heures de début et de fin des plages de travail le matin et l'après-midi. Une plage de travail est une plage de disponibilité continue pour l'allocation de l'unité de main d'œuvre aux activités. Le plan annuel d'emploi est doté d'un calendrier de jours de congé, et il spécifie les limites supérieures du nombre d'heures de travail sur l'année et par jour.

Les unités de main d'œuvre sont différenciées par leurs statuts (ouvriers ou chef d'exploitation) et leurs compétences, lesquelles permettent de distinguer sept classes de main d'œuvre. A chaque statut correspond un plan d'emploi et à chaque classe correspond un ensemble de tâches autorisées (e.g. tous travaux, travaux motorisés, taille, travaux manuels en vert).

La disponibilité d'une unité de main d'œuvre est contrainte par son plan de travail, et par une contrainte spécifique qui stoppe l'activité de l'unité au-delà d'une certaine quantité cumulée de pluie reçue depuis le début de la plage horaire.

2.2.3 Le système décisionnel

2.2.3.1 La notion de chantier

Le modèle Dhivine est fortement marqué par une activité non primitive particulière : le chantier. On définit le chantier comme la mise en œuvre d'une opération culturale (e.g. le chantier de taille, le chantier de travail du sol) sur un ensemble de parcelles, et ce, une seule fois sur chacune des parcelles. Selon l'ontologie DIESE, un chantier est donc un ensemble d'activités primitives, chacune correspondant à la mise en œuvre de l'opération concernée sur une parcelle.

Une fois choisie la classe d'activités primitives en jeu, un chantier se caractérise par le matériel et la main d'œuvre mobilisés, son mode d'organisation, les parcelles concernées et leur ordre de passage, ses conditions d'ouverture et de fermeture. Lorsque deux chantiers sont en concurrence pour l'allocation des ressources et l'exécution, ce sont les priorités d'allocation et d'exécution portées respectivement par les activités et les opérations qui déterminent les choix.

a. Mobilisation des ressources

Parce qu'il concerne une opération culturale, un chantier mobilise les équipements nécessaires à cette opération, et hérite des contraintes de faisabilité de l'opération et de la vitesse de réalisation liées au matériel utilisé.

Pour les opérations manuelles, la condition de faisabilité est considérée toujours satisfaite dans Dhivine. Pour les opérations motorisées, la faisabilité dépend d'une condition de trafficabilité du sol, et, pour le travail du sol, d'une condition de travaillabilité. Ces deux conditions sont basées sur un cumul de pluie durant les 7 jours précédant l'intervention.

La vitesse de réalisation d'une opération comporte plusieurs facettes : (i) la vitesse nominale exprimée en nombre de souches opérées par heure (pour les opérations manuelles) ou en km/h (pour les opérations motorisées) qui est une donnée d'entrée de la simulation ; (ii) la vitesse unitaire en ha/h/personne qui dépend de la vitesse nominale et, selon le cas, du nombre de souches par ha ou du nombre de km parcourus par ha, lequel varie selon la proportion d'inter-rangs parcourus et l'écartement des rangs de vigne ; (iii) la vitesse réelle en ha/h qui est le produit de la vitesse unitaire par le nombre de personnes mobilisées.

Parce que plusieurs unités d'équipements et de main d'œuvre peuvent être compétentes dans une exploitation agricole pour réaliser une même opération dans une parcelle, et afin de donner de la flexibilité dans la sélection des ressources nécessaires par l'algorithme simulation, cette sélection dépend d'un opérateur sur les ressources. Différents opérateurs sont utilisés qui permettent (i) soit de choisir, dans un ensemble d'équipement (e.g. un tracteur et un outil tracté), n'importe lequel utilisable pour réaliser l'opération ou, s'il s'agit d'une unité de main d'œuvre, n'importe laquelle parmi les unités compétentes; (ii) soit de sélectionner toute la main d'œuvre compétente disponible. Le premier type d'opérateur est mobilisé pour les opérations motorisées et celles de pulvérisations manuelles. Le second type est mobilisé pour les autres opérations manuelles.

b. Organisation des chantiers

Deux types de chantiers correspondant à deux types de mise en œuvre des activités primitives sous-jacentes ont été définis. Lorsque le type d'opération, ou la situation générale des ressources, ou une préférence quelconque du gestionnaire, justifie que deux ou plusieurs parcelles puissent être traitées en même temps (en recouvrement partiel ou total des durées d'opération), le chantier est qualifié de « parallèle ». Il est représenté par une conjonction d'activités primitives (opérateur *And*). Lorsqu'il est justifié que les opérations dans un chantier soient toujours mises en œuvre dans chaque parcelle

successivement, sans recouvrement, le chantier et qualifié de « en série ». Il est représenté par une disjonction d'activités primitives (opérateur *Meef*).

c. Sélection dynamique des parcelles

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 demi-journée. Pour un chantier donné, la liste ordonnée des parcelles à faire (et donc des activités primitives) va donc être revue deux fois par jour. 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.

Le principe de la constitution dynamique des listes de parcelles est le suivant. A l'ouverture d'un chantier, une première liste est créée. Puis, à chaque demi-journée jusqu'à la fermeture du chantier, la liste est mise à jour : les parcelles terminées sont retirées, les parcelles en cours sont maintenues, les parcelles 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 nouvel examen du programme en début de demi-journée. Pour ce faire, l'heuristique utilisée dans Dhivine consiste à arrêter l'ajout de nouvelles parcelles à opérer lorsque la durée prévisionnelle de toutes les opérations sur les parcelles en cours et sur les nouvelles dépasse ce qu'on appelle « l'offre en temps de travail », c'est-à-dire le produit de la durée de la plage de travail par le nombre d'unités de main d'œuvre mobilisables pour l'opération concernée. Les nouvelles parcelles à opérer sont sélectionnées sur des critères d'enchaînement chronologiques des opérations à la parcelle. Par exemple, une parcelle ne pourra pas être sélectionnée pour le broyage des sarments tant qu'elle n'aura pas été taillée. De la même façon, au printemps une parcelle ne pourra pas être sélectionnée pour la réalisation d'un travail du sol si le nombre de jours depuis le précédent travail du sol est inférieur à un certain seuil.

d. Contraintes temporelles

Chaque chantier possède des conditions d'ouverture et de fermeture. Ces conditions peuvent être une combinaison de conditions qui renvoient à des dates calendaires, des états biophysiques, des conditions climatiques, des états d'avancement d'autres chantiers, etc.

Un chantier implique généralement le parcours de toutes les parcelles de l'exploitation où l'opération est possible. Lorsque dans la stratégie du gestionnaire, il est justifié d'arrêter le parcours des parcelles avant sa fin, on modélise cela dans la condition de fermeture du chantier. Par exemple, le chantier d'épamprage est arrêté le 15 juin même si toutes les parcelles concernées n'ont pas été opérées.

e. Degrés de priorité

Parce que les chantiers sont susceptibles de mobiliser le même matériel et/ou la même main d'œuvre au même moment, ils sont dotés, via les activités primitives qui les composent, de degrés de priorité pour l'allocation des ressources et de degrés de priorité d'exécution. Ces degrés de priorité, mobilisés par l'algorithme général de simulation (cf. infra) permettent de mimer la façon dont les viticulteurs gèrent les situations de concurrences. Le premier type vise à éviter que des activités n'utilisant pas de main d'œuvre spécifique ne mobilisent la main d'œuvre spécifique dont aurait besoin une autre activité (par exemple, éviter qu'une activité basée sur une opération manuelle ne mobilise les chauffeurs de tracteur au détriment des activités basées sur des opérations motorisées). Une fois les activités dotées de leurs ressources, le second type de priorités vise à sélectionner un jeu d'activités à exécuter lorsque plusieurs ont été trouvés possibles, en fonction des préférences du viticulteur.

2.2.3.2 La stratégie de conduite

Dans Dhivine, la gestion d'un vignoble concerne un cycle cultural annuel. La stratégie de conduite du vignoble est basée sur le choix (i) d'un plan général d'activités qui définit une liste chantiers à réaliser et (2) d'options de gestion qui définissent les détails de mise en œuvre de ce plan.

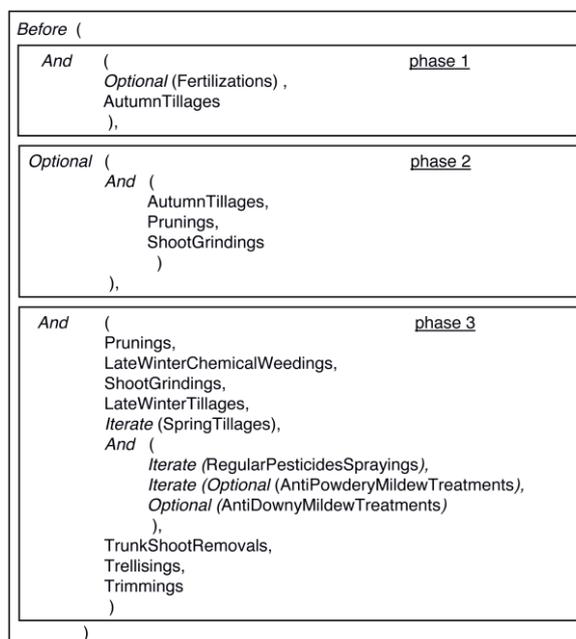


Figure 18: Exemple de plan d'activités

Un plan standard est décrit dans la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**. Ce plan est structuré en une succession chronologique (opérateur *Before*) de trois phases, chacune représentant une liste non ordonnée (opérateur *And*) de chantiers à réaliser. Au sein de chaque phase, les chantiers s'organisent dynamiquement en cours de simulation en fonction de leurs caractéristiques qui dépendent notamment des options de gestion choisies.

Les options de gestion pour la mise en œuvre de ce plan concernent trois composantes de la gestion, jugées les plus variables entre exploitations :

- les modalités de mise en œuvre des chantiers. Ces modalités concernent les conditions de déclenchement et d'arrêt des différents chantiers, à choisir parmi un ensemble de conditions pré-codées dans le modèle. Elles concernent également les modes d'organisation de chacun des chantiers (en série ou en parallèle), lesquels peuvent varier selon les phases du plan ;
- les modalités de gestion des concurrences entre chantiers avec la fixation pour chaque chantier et chaque phase du plan des degrés de priorité d'allocation et d'exécution ;
- les modalités d'entretien du sol. Le modèle permet de décrire les combinaisons de techniques d'entretien du sol (désherbage chimique, travail du sol, enherbement permanent) utilisées au sein des parcelles et/ou entre groupes de parcelles d'une exploitation.

2.2.3.3 Organisations particulières de certains chantiers

Certaines opérations doivent, en fonction du contexte, être répétées dans le temps pour satisfaire l'objectif de la conduite. C'est notamment le cas du labour de printemps à fonction de désherbage. Si l'herbe repousse trop, il faut labourer à nouveau. Ce morceau de plan est exprimé en plaçant le chantier de labour de printemps comme élément d'une activité itérative, abstraitement exprimée dans la Figure 18. Le nombre de répétitions et le délai entre deux passages dépendent du contexte et de la condition de déclenchement d'un nouveau chantier choisie. Ainsi par exemple, dans le cas le plus général, le chantier de labour est répété après un certain délai en nombre de jours et un cumul donné

de pluie depuis le travail précédent sur au moins une proportion donnée de la surface de l'exploitation. Une autre option possible est de déclencher aussi un nouveau labour après un certain délai pendant lequel il n'a pas été justifié de le faire par l'atteinte du seuil de pluie (c'est-à-dire après une période « sèche » suffisamment longue).

Par ailleurs, certains chantiers peuvent être mis en œuvre ou non, en fonction du contexte, sans constituer un défaut de conduite. Considérons, par exemple, la pulvérisation de pesticides contre les ravageurs et maladies, abstraitement défini dans la Figure 18 par l'opérateur *And* au sein de la phase 3. Dans cette partie du plan, l'opérateur *Optional* que les chantiers *AntiPowderyMildewTreatments* et *AntiDownyMildewTreatments* sont optionnels, ce qui signifie qu'ils peuvent ne pas être réalisés sans causer un échec du plan. Dans les vignobles, la lutte contre le mildiou et l'oïdium est généralement réalisés simultanément par des pulvérisations régulières de pesticides au cours du printemps et de l'été, ce qui correspond dans notre modèle au chantier *Iterate RegularPesticidesSprayings*. Des niveaux particuliers de pression oïdium ou mildiou, évalués dans notre modèle en utilisant les données d'un service régional d'avertissement agricole (Performance Vigne ®), peuvent nécessiter des pulvérisations supplémentaires spécifiques à ces deux cas. Ces situations sont exprimées au travers des prédicats d'ouverture des deux chantiers concernés.

2.3 Initialisation et lancement d'une simulation

Dans notre approche, l'étude de l'impact environnemental de la conduite d'un système viticole passe par la simulation de sa dynamique et de son fonctionnement dans une gamme de cas (ou de contextes) permettant la généralisation des résultats. On définit ici ce qu'est un cas (ou contexte) de simulation, et comment il est exprimé préalablement à la simulation. Puis on indique comment est lancée une simulation, quels sont les mécanismes de changement d'état du système qui sont activés, et quels sont les événements externes et internes qui contrôlent ces mécanismes.

2.3.1 Description de l'état initial du système simulé

Un contexte de simulation est caractérisé par une structure initiale particulière du système biophysique piloté, les propriétés de son environnement climatique, sanitaire et d'évolution des stades phénologiques, la dotation en ressources en matériel et main d'œuvre et la stratégie de conduite représentée par le plan et les options de gestion choisies. Dans Dhivine, trois formes sont utilisées pour décrire un cas de simulation : les instances de classes ; les paramètres ; les fichiers à lectures séquentielles

2.3.1.1 Un ensemble d'instances de classes

Un langage dédié attaché à l'implémentation de l'ontologie permet de créer des instances des classes du modèle structurel général du système viticole, de donner des valeurs particulières à leurs descripteurs et de spécifier des relations structurelles avec d'autres entités. Les phrases de ce langage sont rassemblées dans plusieurs fichiers lus par le simulateur en préambule du lancement de la simulation et qui permettent de décrire les options de gestion qui représentent la diversité des stratégies de conduite des viticulteurs objets de la simulation.

Un exemple est celui des priorités d'allocation. Une option de priorités d'allocation est présentée comme une instance d'entité (appelée ici *ap_optionSet1*) de la classe Dhivine désigné comme *allocationPriorityOptionSet*. Cette instance est créée par la lecture de la séquence suivante d'instructions (réduits à des fins de simplification) qui commence avec l'instruction d'instanciation (ligne commençant par + I). Un élément d'entité est créée pour chaque classe d'opération (lignes commençant par + E), et à son descripteur unique (*standardValuePriorityTab*) est donnée une valeur de vecteur (par exemple, {10 -9 10}) correspondant aux trois phases identifiées dans le plan d'activité. Lorsque cette option est choisie, la fertilisation a une priorité plus élevée (10) que le travail du sol (30) dans la phase 1, alors que le travail du sol a une priorité plus élevée (1) que la taille (50) dans la phase 2.

```
+ I allocationPriorityOptionSet ap_optionSet1
//-----Fertilisation-----
+ E allocationPriorityOptionSubset fertilizationActivity
    standardValuePriorityTab << 10 -9 10;
;
//-----Tillage-----
+ E allocationPriorityOptionSubset autumnTillageActivity
    standardValuePriorityTab << 30 1 -9;
;
//-----PruningActivity-----
+ E allocationPriorityOptionSubset guyotPruningActivity
    standardValuePriorityTab << -9 50 50;
;
//-----;
```

Ce langage est également utilisé pour lister, toutes les stations météorologiques choisies pour représenter le climat auquel est soumis le vignoble et indiquer leurs positions (latitude longitude).

2.3.1.2 Un ensemble de paramètres

Un ensemble de paramètres scalaires permet d'exprimer des valeurs partagées par l'ensemble des exploitations modélisées, et, dans une même exploitation, par plusieurs classes ou plusieurs instances d'une même classe. Ces paramètres sont par exemple, la durée réglementaire normale d'une journée de travail, les plages horaires de travail, ou encore le seuil maximum de cumul de pluie sur les sept jours précédents permettant de déterminer si la condition de faisabilité d'une opération motorisé (la trafficabilité du sol) est satisfaite. Ces paramètres sont spécifiés dans un fichier lu par le simulateur en préambule de la simulation et dont on peut voir un extrait ci-dessous :

```
standardWorkingTime day <- 8 "hours";
"trafficabilityRainMaxThreshold" "mechanicalOperation" <- 60.0 "previous 7 days";
```

2.3.1.3 Un ensemble de fichiers en entrée

Des fichiers de données, avec des lignes d'un format dédié propre à Dhivine, permettent d'organiser des ensembles de valeurs de manière concise. De tels fichiers sont utilisés pour décrire le parcellaire de l'exploitation ou des exploitations objets de la simulation, l'ensemble des ressources en matériel et main d'œuvre mobilisables dans chaque exploitation et la stratégie de conduite de chaque viticulteur.

Par exemple, la nature, le nombre et certaines caractéristiques des ressources disponibles sont codifiées dans un fichier comprenant une ligne par exploitation telle que :

```
MG11 FF_c.0.0.0.0.FF.0 none 1high_150.2med_160.0low 2airsp.0debsp.2backsp.1tank.1hrail.1vrrail.1hhgun.0cp 2sptine.1rot.0nrot
1mart.1hs.1giro 1sprd_sh.1clip_sh.0prun.0tre
```

où le premier champ désigne l'exploitation, et où les champs suivants décrivent les pools de main d'œuvre, de tracteurs et d'équipement de pulvérisation, travail du sol, broyage, et autres opérations motorisés.

La description du parcellaire est donnée par un fichier contenant une ligne par parcelle et où les deux premiers champs désignent les noms de l'exploitation et de la parcelle respectivement, et où les autres champs précisent certaines caractéristiques de la parcelle (latitude, longitude, âge, cépage, largeur de l'inter-rang, etc.).

Enfin, la stratégie de conduite est spécifiée dans un fichier comprenant une seule ligne par exploitation où le premier champ désigne l'exploitation, et où les champs suivants indiquent, successivement, le plan global d'activités, et les options de conduites choisies pour chacune des trois composantes de la gestion.

Les fichiers évoqués ci-dessus sont intégralement lus en préambule du lancement de la simulation dynamique.

Un autre type de fichiers est également utilisé pour décrire l'environnement des exploitations (le climat, le niveau de pression sanitaire) et l'évolution des stades phénologiques. Ces fichiers contiennent des lignes ordonnées selon des dates croissantes, à intervalles constants pour la météo et de manière événementielle pour la pression sanitaire et les stades. Ils sont donc lus progressivement en cours de simulation, de manière synchronisée avec les autres processus.

2.3.2 Lancement et entretien de la dynamique du système

2.3.2.1 L'agenda d'évènements

Par conception du moteur de simulation, ce sont des événements qui déclenchent les processus de changement d'état du système simulé, puis qui les entretiennent lorsque le changement d'état n'est pas complètement réalisé en un seul instant. Certains de ces événements font partie de la connaissance sur le domaine d'étude (e.g. les événements liés processus de changements de stades phénologiques des différentes variétés de vigne. Les autres sont des événements prédéfinis dans l'ontologie des systèmes de production parce qu'ils ont été reconnus de portée générale (e.g. l'évènement *UpdateSituation* qui cause la mise à jour du statut des activités). D'un autre point de vue, certains événements sont déclarés intentionnellement en entrée du simulateur, et les autres sont programmés dans l'agenda par conséquence de la survenance des premiers. C'est notamment le cas lorsqu'un événement est doté d'une fonction d'auto-génération dont le rôle est de replacer l'évènement dans l'agenda, à une position (date) déterminée par une connaissance particulière. Les événements les plus déterminants dans le rythme et les moments d'évolution du système sont décrits dans les sous-sections suivantes.

Qu'ils soient déclarés intentionnellement ou générés en cours de simulation, les événements sont rangés dans un agenda par ordre croissant de leurs dates d'occurrence. Le moteur de simulation répète, tant que l'agenda n'est pas vide, ou que la date de fin de la simulation n'est pas dépassée, le retrait de l'évènement de tête, l'avancement de l'horloge de la simulation à sa date d'occurrence, puis le lancement du ou des processus associés.

Le lancement de la simulation s'opère dans la fonction principale du simulateur, après la lecture des fichiers décrivant le contexte initial. Cela consiste à initialiser à 0 la valeur entière de l'horloge de la simulation puis à invoquer la procédure prédéfinie de traitement de l'agenda d'évènements. Dans un fichier dédié à cela en entrée du simulateur, la valeur initiale de l'horloge (0) est associée à une date calendaire, et on précise le laps de temps constant correspondant à une progression d'une unité de la valeur de l'horloge (1 h dans Dhivine). Ainsi il sera toujours possible d'associer une date calendaire à une valeur de l'horloge, et vice-versa (par des fonctions prédéfinies dans le moteur de simulation. La date de fin de la période de simulation est spécifiée dans le même fichier que la date de son début.

2.3.2.2 Dynamique du système biophysique

Les changements de stade phénologiques sont provoqués par la lecture d'un fichier de données en entrée, dont les lignes contiennent une date, un nom de variété et le stade atteint par cette variété à cette date. Les lignes sont rangées par dates croissantes. Un événement initial est intentionnellement programmé en entrée de la simulation, qui lit la première ligne et programme un événement de changement de stade à la date indiquée pour la variété indiquée. Lorsqu'il arrive en tête de l'agenda, cet événement réalise le changement de stade, puis lit la ligne suivante et programme un changement de stade à la date indiquée, et ainsi de suite tant qu'il y a des lignes non lues.

L'arrivée d'information sur un risque de maladie ou un niveau d'infection est modélisée sur le même principe que les changements de stade, et en utilisant le même type de fichier. Dans les deux cas, les événements ne se produisent pas à intervalles réguliers, mais seulement aux dates indiquées dans chaque ligne du fichier. L'évènement à l'instant t lit une ligne comportant nécessairement une date t' dans le futur (ou égale à t), et le prochain événement ne surviendra qu'en cette date t' .

La météorologie du lieu est utilisée au pas de temps horaire. Les données disponibles sont sous la forme d'un fichier de données historiques, comportant une ligne par heure dans la période simulée.

Les lignes sont rangées par dates croissantes. Un et un seul événement est intentionnellement rangé dans l'agenda avant le lancement de la simulation : il initie un processus continu dont l'effet est de lire une ligne et d'interpréter les champs comme les valeurs courantes des variables météorologiques (uniquement la pluie dans la version actuelle du modèle). Ce processus s'auto-entretient en programmant un événement prédéfini de continuation en l'instant courant augmenté de une heure.

2.3.2.3 La dynamique du système opérant

Le changement d'état du système opérant qu'il convient essentiellement de simuler est l'évolution des conditions d'emploi des unités de main d'œuvre (structure de la semaine de travail, limites légales du nombre d'heures de travail). Cet état est le facteur principal de la disponibilité de ces unités, complété par la donnée des périodes de congé. Comme expliqué plus précédemment, les conditions d'emploi d'une unité de main d'œuvre sont encapsulées dans un plan annuel d'emploi, contenant une succession de cinq saisons d'emploi.

En un jour donné, la reconnaissance qu'une transition entre deux saisons doit être opérée, pour une unité de main d'œuvre donnée, est provoquée par un événement particulier qui exécute un processus ponctuel en cet instant. Ce processus teste, pour chaque unité de main d'œuvre, si l'instant courant reste dans la période en cours ou au passé à l'intérieur de la période suivante. Dans le second cas cette période suivante devient, pour l'unité de main d'œuvre considérée, la période courante. Pour capter exactement toutes les transitions de saisons, un tel événement doit intervenir tous les jours. A cette fin, un unique événement de ce type est programmé le matin du premier jour de la période simulée, et on lui donne la capacité de s'auto-générer à la première heure de travail le lendemain.

2.3.2.4 Le fonctionnement algorithmique du système décisionnel

Dhivine exploite les outils prédéfinis dans l'ontologie des systèmes de production (Martin-Clouaire et Rellier, 2009) pour lancer et entretenir la dynamique du système décisionnel. Un événement prédéfini gère un processus qui met à jour l'état du plan global d'activités. Et cet événement programme lui-même un autre événement au même instant : celui en charge de l'allocation de ressources aux activités, du choix du meilleur jeu à opérer, puis enfin du lancement la progression des opérations associées.

Non seulement un événement de mise à jour du plan en programme d'autres complémentaires au même instant, mais il est aussi doté de la capacité d'auto-génération d'un même événement à une date ultérieure. Dans Dhivine, un nouvel examen du plan intervient toutes les deux heures. Si cet examen tombe entre deux plages de travail, il est repoussé au début de la plage de travail suivante (celle de l'après-midi, ou celle du lendemain matin).

Un tel événement de révision du plan, et un seul, est donc intentionnellement programmé pour le début de la période de simulée (début octobre). Le moteur de simulation se charge ensuite de générer automatiquement les suivants, jusqu'à la fin de la période de simulée (généralement fin août).

Parce que le modèle décisionnel de Dhivine est structuré par la notion générique de plan d'activités définie comme un programme d'actions flexible, la simulation du système de production s'appuie sur un algorithme général d'interprétation et d'exécution de ce programme. Dans sa position de spécialisation du modèle générique, le modèle Dhivine ne fait que donner à certaines fonctions de l'algorithme général un corps particulier matérialisant les connaissances propres au pilotage d'un système viticole.

En précisant préalablement que toute activité, comme tout plan d'activités, possède un « cycle de vie » standard qui la voit passer par les états 'sleeping', 'waiting', 'open', 'in course' et 'closed', l'algorithme général du pilotage consiste, schématiquement, à changer l'état de l'activité-racine du plan de 'sleeping' à 'waiting', puis à répéter la séquence suivante tant que l'activité-racine du plan n'est pas à l'état 'closed' et que la fin de la période simulée n'est pas dépassée :

1. mise à jour de l'état de chacune des activités du plan, c'est-à-dire passage à l'état successeur si le contexte simulé le justifie,

2. constitution d'un ensemble de jeux alternatifs d'activités dans l'état 'open' ou 'in course', c'est-à-dire de candidats à la désignation de l'unique jeu qui va être opéré ; on élimine ici les activités dont l'opération a sa condition de faisabilité non satisfaite,
3. tentative d'allocation de ressources à chacun de ces jeux successivement ; cette phase résulte possiblement en la réduction des jeux initiaux dont l'allocation totale n'est pas possible, et en l'établissement d'un nouvel ensemble de jeux alternatif complètement alloués,
4. mise en œuvre conjointe d'un ensemble de règles de préférences entre les jeux alloués candidats, résultant en l'affichage, à l'attention du système opérant, du jeu d'activités à opérer concurremment.

L'algorithme général de simulation rencontre alors dans son agenda des événements provoquant le démarrage ou la poursuite de processus d'avancée des opérations. Ces processus sont entretenus à chaque progression de l'horloge de la simulation, tant que ne revient pas en tête de l'agenda un nouvel événement qui provoque une répétition de la séquence décisionnelle ci-dessus.

Dhivine spécialise, essentiellement, deux maillons de cette chaîne de traitement générale : (i) l'ordonnancement des activités, en tenant compte de leur degré de priorité d'allocation, dans les jeux qu'on va tenter d'allouer en ressources ; (ii) le choix du jeu préféré parmi les jeux alloués candidats, en tenant compte du degré de priorité d'exécution de chacune des activités des jeux. La spécialisation de ces deux maillons permet au moteur de simulation de sélectionner le jeu d'activités qui inclue les opérations les plus prioritaires, tout en assurant la continuité des opérations et des opérateurs engagés sur une plage horaire de travail et la maximisation de l'utilisation des ressources en main d'œuvre.

2.4 Application au cas d'une exploitation de la plaine viticole Héraultaise

Nous présentons ici les résultats de l'application du modèle Dhivine au cas de l'exploitation viticole *MG11* localisée dans la plaine viticole Héraultaise dans le Sud de la France. *MG11* fait partie de l'échantillon des 54 exploitations enquêtées pour la définition des options de conduite proposées au choix dans le modèle (Paré, 2011). Par ailleurs, une des parcelles de cette exploitation est localisée dans un bassin versant de 90 ha, le bassin de Roujan, qui fait depuis plusieurs années l'objet de suivis des flux d'eau et matières associées (herbicides notamment). De ce fait, cette parcelle a été l'objet d'enquêtes et/ou d'observations sur les pratiques et calendriers d'entretien du sol au cours de trois cycles culturaux successifs (2004-2004, 2005-2006, 2006-2007).

Après avoir décrit les choix de paramétrisation, nous montrons que le modèle, paramétré avec les ressources, le plan d'activités et les options de gestion qui permettent de reproduire la conduite du viticulteur, simule de manière satisfaisante les calendriers de travail du sol relevés sur la parcelle de Roujan. En comparant les résultats avec ceux d'un modèle simplifié de gestion du vignoble, nous montrons que la prise en compte des chantiers qui sont en concurrence avec le travail du sol améliore considérablement le réalisme des résultats de la simulation pour le cycle caractérisé par un printemps pluvieux. Nous montrons également, sur l'exemple du cycle 2006-2007, que des modifications d'organisation du travail impactent fortement ce calendrier, avec notamment une modification du nombre d'itérations de travail du sol.

2.4.1 Le cas d'étude et sa paramétrisation

L'exploitation *MG11* possède 44 ha de vigne répartis entre 21 parcelles localisées dans un rayon de 2,5 km. Les parcelles sont plantées de différents cépages (12 cépages différents), avec des densités variant de 3330 à 4444 pieds/ha. Elles sont toutes palissées et motorisables du fait d'écartement entre les rangs de plus de 2 m. *MG11* est conduite par deux frères qui se consacrent majoritairement à la conduite du vignoble et participent à l'ensemble des tâches. Des ouvriers sont recrutés au moment de la taille et des travaux manuels en vert (épamprage, palissage), de façon à avoir au total l'équivalent de deux personnes à temps plein tout au long de l'année et de quatre personnes au moment de la taille. Ces ressources sont représentées dans Dhivine par deux instances à temps plein de la classe des travailleurs multitâches et deux instances à temps plein de la classe des tailleurs.

L'exploitation possède trois tracteurs et est équipée de façon à pouvoir réaliser en parallèle, sur deux parcelles simultanément, les chantiers motorisés de travail du sol, broyage des sarments et traitements phytosanitaires. Les chantiers motorisés de désherbage chimique, rognage et épamprage chimique sont quant à eux réalisés en série. Le matériel, les vitesses nominales et les conditions de faisabilité associés aux différents chantiers sont présentés dans le Tableau 9.

Tableau 9 : Les caractéristiques des chantiers dans l'exploitation chez MG11

Chantier	Outils tractés	Vitesse	Conditions de faisabilité
Rognage	1 rogneuse	6.0 km/h	Trafficabilité: $P[j - 7; j] < X1$
Désherbage chimique et épamprage chimique	1 tank + 1 lance manuelle	4.0 km/h	Trafficabilité: $P[j - 7; j] < X1$
Fertilisation	1 épandeur d'engrais	6.0 km/h	Trafficabilité: $P[j - 7; j] < X1$
Traitements Phytosanitaires	2 pulvérisateurs	6.0 km/h	Trafficabilité: $P[j - 7; j] < X1$
Taille	-	75 cep/h	-
Broyage des sarments	2 broyeurs	5.0 km/h	Trafficabilité: $P[j - 7; j] < X1$
Travail du sol	2 cultivateurs à dents	4.0 km/h	Travaillabilité: $P[j - 7; j] < X2$
Palissage	-	600 cep/h	-

$P[d1 ; d2]$ = cumul de pluie entre d1 and d2; j = date du jour ; X1 = 60 mm; X2 = 40 mm

Le plan général d'activité sélectionné pour MG11 est celui représentée sur la Figure 19. Les prédicats (ou conditions) d'ouverture et de fermeture des différents chantiers sont présentés dans le Tableau 10. Un prédicat est une expression booléenne qui produit une valeur booléenne (vrai ou faux) lors de l'évaluation. D'autres descripteurs, dont les valeurs sont une constante (par exemple, un numéro ou nom de classe), sont aussi présentés dans ce tableau lorsqu'ils sont utilisés dans l'expression des prédicats.

La stratégie d'entretien du sol est basée sur un entretien des rangs par désherbage chimique et des inter-rangs par travail du sol. Elle est associée au motif intra-parcellaire $\{r = 0.3, q = 0\}$. Comme on le voit dans le tableau 10 (descripteurs 1 à 7) le prédicat d'ouverture du chantier de désherbage chimique (D6) postule que cette activité ne peut pas se produire avant le 25 Février, ni avant la fin de la taille et du broyage des sarments. Le travail du sol est effectué tout au long de l'année, y compris après la vendange (D1) pour décompacter le sol. Plusieurs passages se succèdent entre la fin de l'hiver et le début de l'été dans le but d'assurer un désherbage mécanique des inter-rangs ou pour créer un effet de mulch. Les passages démarrent en fin d'hiver entre mi-février et mi-mars (D3), selon l'état d'enherbement des parcelles, lequel est sous la dépendance du cumul de pluie hivernale. Ils sont ensuite renouvelés en fonction des levées d'adventives liées aux épisodes pluvieux (D4) et ce jusque début juillet (D5). En cas de printemps sec, la création d'un effet mulch est assurée par un travail du sol minimum (D4).

La stratégie de protection phytosanitaire (descripteurs 8 à 15 du Tableau 10) est de type raisonné. La protection anti-oïdium régulière démarre lorsque le cépage 'chardonnay' (D8) a atteint le stade '5-6 feuilles' (D10) et s'arrête lorsque le cépage 'carrignan' (D9) a atteint le stade 'fermeture de la grappe' (D11). La protection anti-mildiou démarre et s'arrête selon le niveau de pression (D12, D13, D4). Les deux types de traitements sont renouvelés tous les 15 jours (D15). Lorsque les périodes de traitement se recoupent, ils sont réalisés simultanément. En plus des traitements réguliers, des traitements intercalaires peuvent être réalisés selon le niveau de pression.

Enfin, la fertilisation est réalisée en octobre en même temps que le travail du sol (D16). La taille démarre début novembre (D17), l'objectif étant d'avoir terminé à la mi-mars. Le broyage des sarments débute en décembre, lorsque 12 ha sont déjà taillés (D18), puis suit l'avancée de la taille. Au printemps, en plus des traitements phytosanitaires et des travaux du sol, les chantiers réalisés sont l'épamprage chimique, le palissage manuel et le rognage des vignes. Ces trois derniers chantiers ne font pas dans Dhivine l'objet de choix d'une option d'ouverture car les enquêtes ont montré que leur mise en œuvre était relativement homogène entre viticulteurs. Leur ouverture est codée dans le

prédicat d'ouverture du chantier. Elle correspond au 20/04 pour l'épamprage, au 20/05 pour le rognage, et dépend de l'atteinte du stade 'floraison' par le cépage guide précoce pour le palissage.

Tableau 10: Valeurs des prédicats d'ouverture et de fermeture des chantiers pour l'exploitation MG11

Descripteur	Valeur
D1 PO travail du sol d'automne	si j >= 20/10
D2 PF travail du sol d'automne	si j >= 31/12
D3 PO travail du sol de fin d'hivers	si j >= 15/02 si P[01/11; 15/02] > 200 ; sinon si j >= 15/03
D4 PO travail du sol de printemps	si {date démarrage dernier chantier de travail du sol < j-30 and P[date démarrage dernier chantier de travail du sol; j] > 40 sur une superficie > 5ha } ou date démarrage dernier chantier de travail du sol = j-45. Dans ce second cas, le nombre maximum d'itérations = n avec n=1
D5 PF itération travail du sol de printemps	si j >= 01/07
D6 PO désherbage chimique de fin d'hivers	si j >= 25/02 et les chantiers de taille et broyage des sarments sont terminés
D7 PO désherbage chimique de printemps	faux (pas de désherbage chimique de printemps)
D8 Variété guide précoce	Chardonnay
D9 Variété guide tardive	Carignan
D10 PO traitements phytosanitaires de routine	Le cépage guide précoce a atteint le stade '5-6 feuilles'
D11 PF traitements anti-oïdium	Le cépage guide tardif a atteint le stade 'fermeture de grappe'
D12 PO traitement anti-mildiou	Si j est un jour pour lequel le fichier de pression maladies indique la présence de foyers primaires et si P[j ; j+3] >= Y avec Y=10 mm
D13 PF anti-mildiou en l'absence de pression sanitaire	Le cépage guide tardif a atteint le stade 'fermeture de grappe'
D14 PF anti-mildiou sous pression sanitaire	Le cépage guide tardif a atteint le stade 'début véraison'
D15 Cadence des traitements réguliers	15 jours
D16 PO fertilisation	si j >= 20/10
D17 PO taille	si j >= 01/11
D18 PO broyage des sarments	Si au moins 12 ha ont été taillés

PO = prédicat d'ouverture; PF = prédicat de fermeture; j = date du jour, P[d1; d2] = cumul de pluie entre d1 et d2

Au printemps, les priorités entre les chantiers concurrents, traduites dans le modèle en degrés de priorité d'opération, sont les suivantes : traitements phytosanitaire > palissage > rognage > épamprage chimique > travail du sol de printemps. Le reste de l'année, parmi les chantiers susceptibles d'entrer en concurrence, les priorités suivantes sont respectées : fertilisation > travail du sol d'automne ; broyage des sarments > travail du sol de reprise > taille ; travail du sol de reprise > désherbage chimique. Par ailleurs, afin de s'assurer que la taille ne mobilise pas la main d'œuvre apte à conduire les tracteurs au détriment des chantiers de travail du sol et de broyage des sarments, ces deux chantiers ont une priorité d'allocation des ressources plus forte que celle de taille.

2.4.2 Expérimentation et résultats

L'expérience réalisée visait à comparer les effets de différentes stratégies de conduite sur le calendrier de travail du sol. La stratégie de conduite identifiée par enquête a été comparée à une stratégie de conduite simplifiée, basée sur un plan général simplifié qui ne prend en compte pas les chantiers qui sont en concurrence avec le travail du sol au printemps (c'est-à-dire, les chantiers de traitements phytosanitaires, épamprage, palissage et rognage). Les effets de deux modifications de l'organisation du travail ont ensuite été évalués. La première modification apporte une répartition plus équilibrée des tâches entre le palissage et les autres chantiers concurrents, avec la possibilité de mener de front plusieurs chantiers, une pratique qui a été observé lors des enquêtes. Le second concerne un changement dans la technique d'épamprage avec passage d'un épamprage chimique motorisé à un épamprage mécanique réalisé manuellement. Cette solution nécessite plus de main d'œuvre et diminue significativement la vitesse nominale de l'opération (18 h/ha/unité de main d'œuvre pour une densité de 4400 pieds / ha au lieu de 1,2 h/ha/unité de main d'œuvre).

Les données de pluie utilisées sont issues de la station pluviométrique installée sur le bassin versant de Roujan. Les trois cycles retenus pour les simulations permettent de couvrir une gamme de variabilité des pluies avec respectivement 404, 623 et 498 mm de pluie annuelle. Les stades phénologiques utilisés sont ceux relevés au cours des trois cycles culturels dans un domaine expérimental voisin et les niveaux de pression mildiou et oïdium sont issus des bulletins d'avertissements agricoles régionaux (Performance Vigne®).

Les sorties des simulations sont le début et la fin de chaque chantier à l'échelle du vignoble, ainsi que le nombre total de travaux du sol et la date de réalisation de chacun d'entre eux sur la parcelle suivie.

Les chronologies des travaux du sol de fin d'hiver et de printemps sol simulées sur la parcelle suivie pour les cycles 2004-2005, 2005-2006 et 2006-2007 sont présentées dans le Tableau 11. Comme indiqué par ces résultats, la modélisation et la simulation de la stratégie de conduite de l'exploitation MG11 permettent de reproduire de façon satisfaisante la variabilité du nombre d'itérations de travail du sol en relation avec la variabilité des conditions climatiques, avec trois itérations pour les cycles 2004-2005 et 2006-2007 et seulement deux pour le cycle 2005-2006. Ce dernier est à la fois caractérisé par un hiver humide expliquant une reprise précoce du travail du sol et un printemps sec ne nécessitant pas un travail du sol intensif. Les caractéristiques des deux autres cycles sont à l'opposé : hivers sec justifiant une reprise tardive du travail du sol et printemps pluvieux nécessitant deux autres passages. À l'exception d'un cas (le deuxième de labour de printemps du cycle 2004-2005), les écarts entre les dates de travail du sol observées et simulées sur la parcelle sont tous inférieurs à 12 jours. Comparativement, la stratégie de conduite simplifiée reproduit correctement les chronologies observées de travail du sol pour les cycles 2004-2005 et 2005-2006, mais pas pour le cycle 2006-2007. Pour ce cycle, une itération supplémentaire est simulée, induite par le printemps pluvieux et l'irréaliste absence de chantiers concurrents.

Tableau 11: Comparaison des dates observées et simulées de travail du sol sur la parcelle Roujan en hiver et au printemps

Cycle	Origine des données	Nombre total de travaux du sol	Date ou intervalle de réalisation			
			TS de fin d'hiver	1ier TS de printemps	2e TS de printemps	TS supplémentaire
2004-2005	Enquête	3	23/03	18/04	24/05	-
	Simulation de la SC enquêtée	3	18/03	28/04	20/06	-
	Simulation d'une SC simplifiée	3	17/03	27/04	11/06	-
2005-2006	Enquête	2	20/02	27/03	-	-
	Simulation de la SC enquêtée	2	17/02	5/04	-	-
	Simulation d'une SC simplifiée	2	17/02	5/04	-	-
2006-2007	Observations	3	[07/03 - 14/03]	[25/04 - 4/05]	[19/06 - 27/06]	-
	Simulation de la SC enquêtée	3	19/03	26/04	15/06	-
	Simulation d'une SC simplifiée	4	17/03	24/04	23/06	24/05

SC = stratégie de conduit, TS = travail du sol

Les impacts des modifications d'organisation du travail testées ont quant à elles été évaluées à l'échelle du vignoble pour le cycle 2006-2007. La Figure 19 représente les calendriers culturels de la stratégie de conduite initiale (a) et des deux nouvelles stratégies (b et c). Le haut de la figure concerne les chantiers qui ne sont pas affectés par les modifications apportées à l'organisation du travail. Ceux qui sont touchés par les changements sont présentés dans la partie inférieure de la figure, pour chacune des trois stratégies (a, b et c) successivement. La figure montre que les changements testés impactent le nombre d'itérations de travail du sol de printemps. La possibilité de mener de front le chantier de palissage et un autre chantier, autorise la réalisation d'un travail du sol supplémentaire (b) par rapport au calendrier initial (a). Inversement, le passage d'un épamprage chimique motorisé à un épamprage mécanique réalisé manuellement se traduit par la suppression d'un travail du sol (c) du fait de l'augmentation du temps nécessaire à la réalisation de l'épamprage.

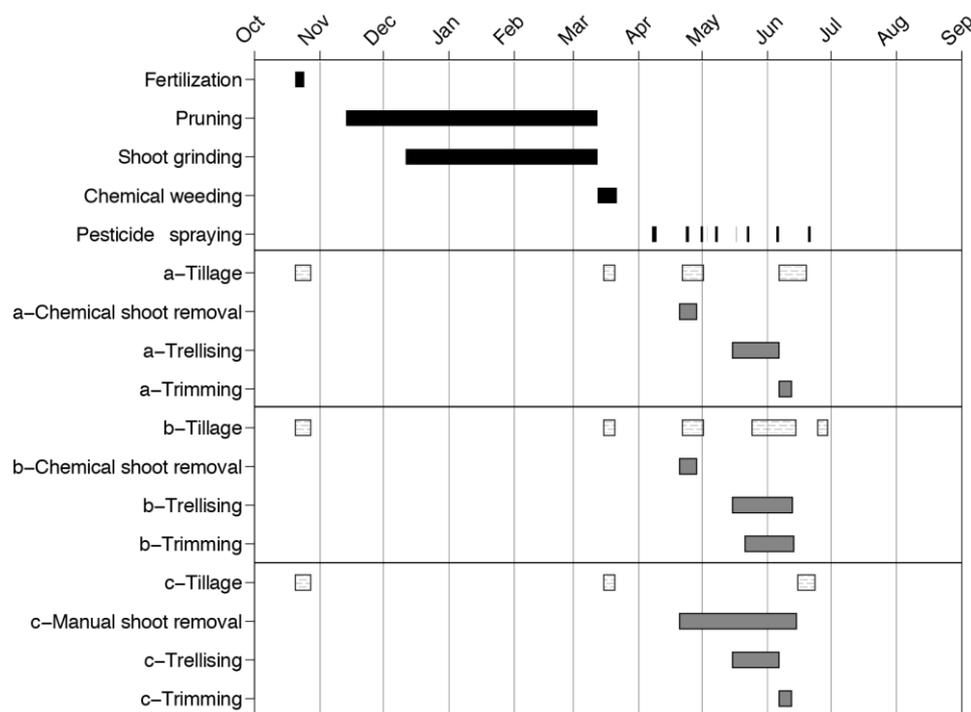


Figure 19: Calendrier des chantiers pour le cycle 2006-2007

2.4.3 Discussion sur les résultats

Les résultats ci-dessus montrent clairement que la prise en compte de l'organisation du travail améliore la précision de la prédiction des opérations d'entretien des sols, en particulier, le nombre d'itérations de travail du sol, quelles que soient les caractéristiques climatiques du cycle simulé. Les résultats montrent également que l'approche est appropriée pour étudier et comparer différentes stratégies de conduite du point de vue de leur impact sur le nombre de travaux du sol réalisés au cours du cycle cultural. L'impact de différents niveaux de ressources en matériel et/ou main d'œuvre aurait également pu être testé.

Concernant la précision des dates simulées, les résultats sont encore à consolider. Les différences entre les dates observées et simulées, doivent en effet être interprétées avec prudence, car les données observées sont entachées d'imprécision et que les dates simulées peuvent être inexactes. Les données observées ont été obtenues par enquête auprès de l'un des deux chefs d'exploitation pour les cycles 2004-2005 et 2005-2006. Comme la majorité des producteurs de la région, ce viticulteur n'enregistre pas systématiquement et précisément les activités menées. Les dates de travail du sol peuvent donc n'être obtenues qu'avec une précision approximative de 15 jours dans certains cas. Pour le cycle 2006-2007, les dates effectives de travail du sol ont été obtenues par l'observation hebdomadaire de la parcelle et non par enquête et, par conséquent, les dates sont connues avec une précision légèrement plus élevée, de 7 à 10 jours. Les dates simulées, quant à elles, peuvent être inexactes pour des raisons variées comme par exemple une représentation inappropriée des prédicats d'ouverture des chantiers, la non prise en compte de certaines activités (e.g. l'entretien des palissages, l'entretien des fossés) susceptible d'entrer en concurrence avec les chantiers modélisés, une représentation inexacte des ajustements saisonniers de la main-d'œuvre, ou encore une évolution non prise en compte de la stratégie de conduite du viticulteur entre deux cycles culturaux.

2.5 Discussion générale

Le modèle Dhivine permet de simuler les itinéraires techniques mis en œuvre sur chacune des parcelles de vigne d'une exploitation en modélisant l'organisation du travail qui sous-tend la conduite d'un vignoble. Cette organisation du travail est modélisée au travers de la prise en compte d'un plan

flexible d'activités qui décrit une liste de chantiers à réaliser au cours du cycle cultural et d'un jeu d'options de gestion. Les plans sont découpés en phases et chaque phase est redevable d'un ensemble particulier de chantiers. Nous nous inscrivons ainsi dans la lignée de travaux concernant l'organisation du travail dans les exploitations de grande culture du nord de la France (Papy *et al.*, 1988 ; Attonaty *et al.*, 1993) qui ont montré la pertinence de la notion de chantier et de phase pour décrire et simuler l'organisation du travail dans une exploitation agricole, avec une forte originalité liée à la résolution spatiale (la parcelle) de notre modèle et à sa spécialisation sur les systèmes viticoles.

Les résultats obtenus sur une application au cas du travail du sol dans une exploitation réelle, montrent clairement que la prise en compte des choix d'organisation du travail améliore la précision du calendrier d'entretien du sol simulé et qu'un tel modèle peut être utilisé pour évaluer l'impact sur les itinéraires techniques de choix d'organisation différents. Des efforts sont néanmoins encore à faire pour augmenter le réalisme des sorties en termes de dates de réalisation des opérations.

Il restera néanmoins toujours une part d'erreur liée au fait que le choix des options décrites dans le modèle et leur utilisation pour particulariser la conduite d'un viticulteur est une tâche difficile qui nécessite la mise à plat de processus décisionnels souvent tacites (Aubry *et al.*, 1998b). De la même façon le repérage et la modélisation des indicateurs utilisés par les agriculteurs est difficile, les agriculteurs basant leurs décisions sur des indicateurs souvent complexes car prenant en compte des critères multiples (e.g. pour le déclenchement du travail du sol, état d'encroûtement du sol, état d'enherbement des parcelles au jour *j*, évaluation de la rapidité de développement du couvert herbacé selon le climat et les espèces). Il est illusoire d'essayer de modéliser toutes les activités et de saisir avec précision les croyances, les intentions, les attitudes et les contraintes des humains impliqués dans la gestion d'un système de production.

Un modèle comme Dhivine ne prétend donc pas reproduire au jour près le calendrier cultural de chacune des parcelles d'une exploitation, mais à simuler le mieux possible les motifs spatio-temporels liés à la réalisation des différents chantiers sur le territoire de l'exploitation. L'évaluation complète d'un tel modèle ne doit donc pas uniquement passer comme nous l'avons fait ici par la comparaison sur une parcelle des écarts entre les calendriers simulés et les calendriers observés pour une opération culturale donnée. Elle devra dans le futur inclure une analyse de la cohérence globale des calendriers simulés, du point de vue de différents types d'experts professionnels (viticulteurs et conseillers techniques, notamment ceux qui produisent les bulletins d'avertissements agricoles).

3 Modélisation des impacts des itinéraires techniques

3.1 Impact des itinéraires techniques sur les évolutions des états de surface à l'échelle de la parcelle

3.1.1 Les états de surface et leurs trajectoires d'évolution

L'état de surface du sol (EdS) est l'association d'un ensemble de composantes de la couverture du sol (*i.e.* éléments grossiers et couverture herbacée) et de l'organisation structurale des 10-15 premiers cm de la surface du sol (*e.g.* croûtes, mottes) qui intervient dans le partage infiltration – ruissellement. Une typologie des états de surface du sol a été établie pour les sols cultivés méditerranéens (Andrieux *et al.*, 2001). Les propriétés d'infiltrabilité de chaque type d'EdS ont été mesurées sous pluie simulée, à l'échelle du m², avec un infiltromètre par aspersion, avec des intensités de pluies stabilisées et caractéristiques du milieu méditerranéen. Les EdS constituent un excellent indicateur de l'infiltrabilité des sols cultivés. Ces résultats sont présentés en annexe (A1 et A2). A l'échelle de la parcelle cultivée, la variabilité des types d'EdS observés à l'intérieur d'une même parcelle est plus faible que celle observée entre parcelles. L'historique cultural de chaque parcelle explique une grande partie de la variance de l'infiltrabilité mesurée entre les EdS (Leonard *et al.*, 1998). Ce résultat valide les distinctions entre les différents types d'EdS établies par la typologie fonctionnelle présentée en annexe (A1).

Suivant le type de sol (teneur en argile principalement), sous l'effet du climat et des pratiques d'entretien du sol, les EdS vont évoluer plus ou moins rapidement au cours du temps. Dans l'objectif de modéliser l'évolution des EdS, notamment entre chaque opération culturale, la dynamique des EdS a été analysée et a permis d'identifier différentes trajectoires d'évolution en fonction du type d'entretien du sol, des caractéristiques pédologiques des parcelles, des événements climatiques et des pratiques culturales mises en œuvre par les agriculteurs (Pare, 2007). Les trajectoires constituent des supports de modélisation de la dynamique des EdS et elles illustrent les effets de la croissance de la végétation herbacée et des interventions de l'agriculteur : du travail du sol, désherbage chimique et broyage de l'herbe sur l'EdS. Au total 3 trajectoires principales ont pu être identifiées (Figure 20). Il s'agit i) de l'évolution des EdS sur sols travaillés (figure 20a), ii) des EdS des sols désherbés chimiquement (figure 20b), et iii) des EdS des sols avec un enherbement, issu de la croissance d'une végétation herbacée spontanée (figure 20c). Une quatrième trajectoire issue de la croissance d'un couvert herbacé semé a été éliminée car elle n'est pas pertinente pour le bassin versant du Rieurtort. En effet, les contacts que nous avons eu avant d'initier le projet (animateur de bassin, cave coopérative, viticulteurs, conseillers de la chambre d'agriculture) ont tous été unanimes : la stratégie d'engazonnement (enherbement semé), qui a été testée sans succès par quelques viticulteurs, ne fait pas partie des stratégies envisageables et acceptables.

Nous avons donc cherché à modéliser l'évolution des EdS entre les opérations culturales pour les trois trajectoires. Les modèles résultants permettant de prédire les évolutions des EdS et leurs propriétés d'infiltration sont intégrées dans la modélisation générale des flux à l'échelle du bassin versant qui est décrite dans la partie 4, §2.5. Les EdS et leurs trajectoires servent également d'indicateurs d'état de l'agrosystème pour la modélisation de la conduite technique du vignoble à l'échelle de l'exploitation viticole (partie 4, §2.3).

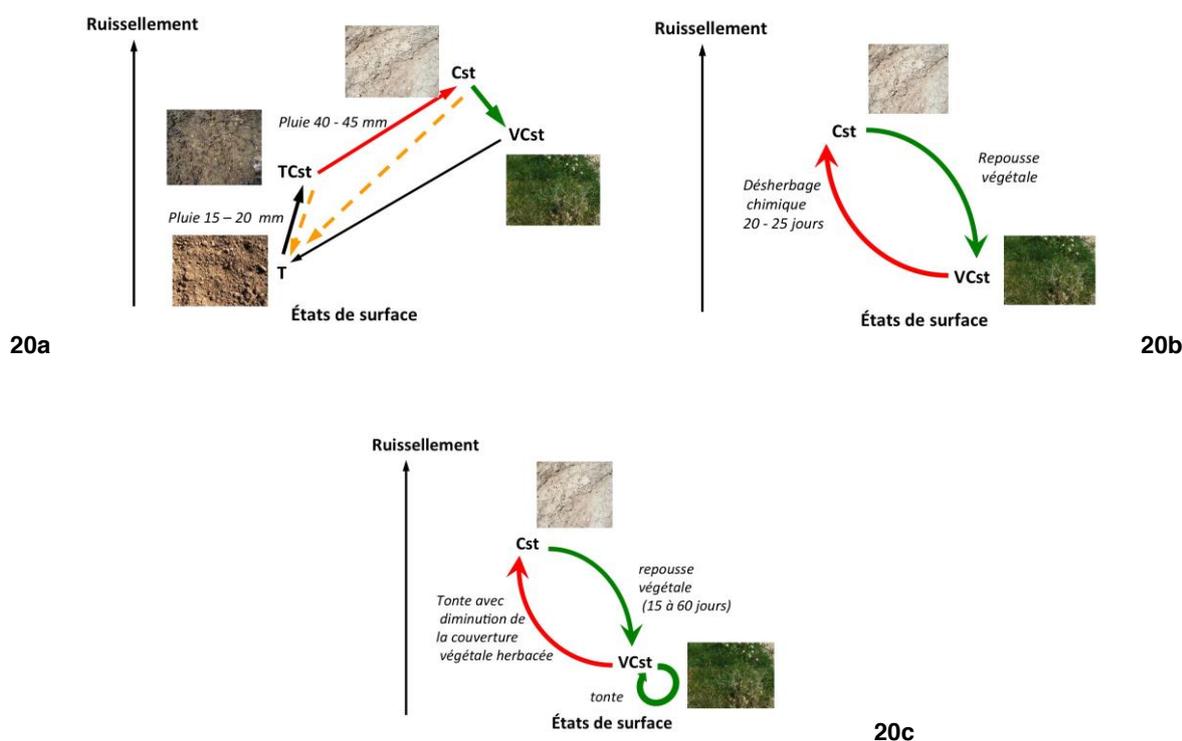


Figure 20 : trajectoire d'évolution des EdS : 20a : évolution des EdS sur sols travaillés ; 20b : EdS des sols désherbés chimiquement ; 20c : EdS des sols avec un enherbement, issu de la croissance d'une végétation herbacée spontanée.

Les différents EdS et leurs propriétés d'infiltration sont présentés en annexe (A1 et A2). T : EdS après travail du sol, TCst : EdS après travail et apparition d'une fine croûte ; VCst : EdS avec un recouvrement de végétation herbacée de plus de 50% ; Cst : sol nu avec croûte structurée consolidée.

3.1.2 Evolution des états de surface des sols travaillés : un modèle original de formation d'une croûte

Après un travail du sol (figure 20a), l'état de surface évolue plus ou moins rapidement sous l'effet de l'énergie cinétique de la pluie (Paré et al., 2011). Après un travail du sol et un état de surface « ouvert » (EdS T), on observe la formation d'une croûte structurale de surface (EdS TCst) jusqu'à la fermeture complète de la surface et la compaction du sol (EdS Cst) (Figure 21).

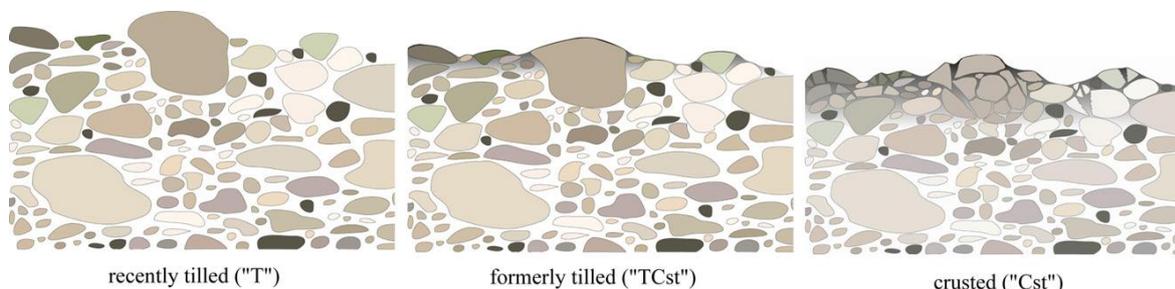


Figure 21: Les trois stades d'évolution des états de surface du sol après travail du sol. Les figurés en gris foncé représentent les cailloux et graviers. Les figurés en autres couleurs symbolisent les mottes. L'ombre grisée dessinée entre les mottes indique l'apparition et l'extension de la croûte structurale.

Dans un délai variable, si les pluies se poursuivent, une végétation herbacée spontanée fait son apparition et si la couverture du sol représente plus de 50 % on identifie un nouvel EdS (VCst). Ce cycle se répète après chaque travail du sol mais il peut être interrompu précocement si un nouveau travail du sol intervient plus tôt (traits pointillés).

Une approche statistique, calibrée sur les données disponibles sur le bassin de Roujan (ORE OMERE) a permis d'aboutir à la *modélisation de la formation d'une croûte structurale* (Paré et al., 2011). L'étude du déterminisme de l'évolution de l'état de surface du sol après le travail, montre que la hauteur de pluie et principalement son énergie cinétique sont les variables clés de cette formation. Les résultats obtenus montrent par ailleurs, qu'une forte rugosité de surface, des mottes de grande taille et un taux d'argile élevé, retardent l'évolution de l'état de surface initial. Le taux d'éléments grossiers dans les premiers centimètres de sol, ralentissent l'évolution vers une croûte juste après le travail du sol (cailloux « libres » et détachés), mais il l'accélère dans un second temps (cailloux « noyés » comme dans un béton).

Au final, cette approche i) estime la probabilité d'occurrence des différents états de surface consécutifs à un travail du sol en fonction des chroniques de pluie et de la teneur en cailloux des horizons de surface du sol et ii) attribue à chaque état de surface une valeur de conductivité hydraulique à saturation. Ce modèle, a été initié dans le cadre de du projet ANR GeDuQuE et a été terminé au tout début du projet. Il constitue un des deux sous-modèles constituant le modèle d'évolution des états de surface présenté au §3.3 et mis en œuvre dans la partie 4 au §2.5.

3.1.3 Evolution des états de surface des sols désherbés chimiquement

A partir d'un état de surface du sol, avec un taux de recouvrement par une végétation herbacée supérieur à 50 % (EdS VCst), l'agriculteur peut être amené à appliquer un herbicide de post-levée pour freiner ou détruire la végétation (figure 20b). Lorsque le taux de recouvrement du sol est inférieur à 50 %, l'état de surface évolue (EdS Cst). La dynamique d'évolution des états de surface n'est alors plus liée qu'au cycle désherbage – repousse de la végétation herbacée. Les relevés montrent en général qu'avec un désherbant de post-levée, 20 à 25 jours sont nécessaires pour passer de l'état de surface VCst à Cst. La croissance de la végétation est alors nulle durant 25 jours même pour les nouvelles cohortes. Au bout de cette durée de 25 jours, la croissance de l'herbe est de nouveau calculée par le modèle pour les nouvelles cohortes de plantes. La végétation ne disparaît pas totalement après l'application d'un herbicide : les tiges d'herbe restent souvent plantées dans le sol et favorisent l'infiltration de l'eau de pluie.

Le temps de repousse de la végétation est variable et dépend des conditions climatiques (cf ci-dessous). La variable « date de désherbage » suffit donc à définir la date de changement d'état de surface et donc de propriété d'infiltration des sols. Il s'agit d'une trajectoire d'enherbement naturel maîtrisé par l'utilisation de produits herbicides.

Dans certains cas, la volonté de l'agriculteur de maintenir un sol nu, l'aura conduit à utiliser un herbicide de pré-levée, pour empêcher l'émergence de nouvelles herbes. La végétation n'atteint jamais un taux de recouvrement supérieur à 50 % et la trajectoire d'évolution reste constante (EdS Cst). Ce cas n'est pas représenté sur la figure 20b.

Au final, la croissance de l'herbe après désherbage chimique, avec passage de l'EdS Cst vers l'EdS VCst a été modélisée et constitue le second sous-modèle constituant le modèle d'évolution des états de surface. Ce modèle de dynamique d'installation, de développement et de sénescence d'une végétation herbacée spontanée est présenté ci-après.

3.1.4 Evolution des états de surface des sols enherbés. Un modèle de dynamique d'installation, de développement et de sénescence d'une végétation herbacée

3.1.4.1 Description de la trajectoire d'évolution des EdS en situation d'enherbement

En situation de sols enherbés les EdS peuvent suivre deux types d'évolution (figure 20c). La première est généralement constante avec un EdS VCst permanent : la végétation herbacée recouvre toujours plus de 50 % du sol même après une tonte par girobroyage. La seconde trajectoire observée fait évoluer l'EdS VCst en un EdS Cst suite à une tonte qui entraîne un taux de recouvrement de la surface du sol inférieur à 50 %, avec corrélativement une diminution des propriétés d'infiltration. Les pluies ultérieures vont entraîner une repousse de la végétation après 15 à 60 jours.

Dans le projet, la tonte de l'herbe n'a pas été prise en compte. Une fois que la croissance de l'herbe a permis à la végétation herbacée d'atteindre un taux de recouvrement du sol supérieur à 50 % (EdS VCst), cet EdS est alors constant dans le temps. Les propriétés d'infiltration de ce type d'EdS sont également constantes dans le temps.

3.1.4.2 Enherbement-type et modèle de croissance de l'herbe sous OpenFLUID

Avant de présenter rapidement le modèle de croissance de l'enherbement utilisé, un premier travail d'observation de la flore et de caractérisation d'un enherbement type par des traits fonctionnels a été réalisé. Cette étape a été initiée sur les bassins versants de la Peyne et de Roujan puis a été finalisée sur le bassin versant du Rieutort pour coller au contexte du projet. A partir de relevés floristiques in situ, un enherbement-type a été constitué i) sur la période automne-hiver (Tableau 12) et ii) sur le printemps (Tableau 13). Chaque enherbement-type ou espèce « moyenne » est défini par des traits fonctionnels moyens agrégés présentés ci-dessous dans le tableau 14.

a. Observation de la flore in situ et caractérisation de l'enherbement-type

Tableau 12: Enherbement type constitué de 5 espèces représentatives d'un couvert spontané en période automne/hiver

Enherbement automne-hiver plurispécifique	
Crepis sancta	46,0 %
Diploaxis erucoïdes	7,0 %
Geranium rotundifolium	13,0 %
Calendula arvensis	14,0 %
Poa annua	20,0 %

La caractérisation de l'enherbement s'est faite par un échantillonnage unique dans le bassin versant, dans une période de transition entre l'hiver et le printemps : des hypothèses ont donc été faites pour le choix des espèces représentant un couvert hivernal ou printanier. De plus, le nombre d'espèces conservées pour créer un enherbement type a été limité à cinq, afin de faciliter le travail de recherche des paramètres liés au couvert végétal. Il est important de garder à l'esprit qu'il y a beaucoup plus d'espèces présentes dans les parcelles que dans notre simulation.

L'échantillonnage des espèces présentes dans les parcelles a été réalisé au cours d'un stage (Nora Dermech, 2013). Les espèces en présence dans les parcelles ont été recensées, et leur fréquence d'apparition a été prise en compte afin de sélectionner un sous-groupe d'espèces les plus abondantes pour chaque période (automne/hiver et printemps/été).

Tableau 13: Enherbement type constitué de 5 espèces représentatives d'un couvert spontané en période printemps/été

Enherbement printemps-été plurispécifique	
Diplotaxis erucoides	13,5 %
Geranium rotundifolium	24 %
Calendula arvensis	25,5 %
Poa annua	37 %

b. Recherche des paramètres pour le modèle de croissance de l'herbe sous OpenFLUID

La consultation de la littérature concernant les traits fonctionnels des espèces prairiales (Vile 2005 ; Pare 2011 ; Leda Traitbase, 2008 ; Ruiz De Clavijo 2005 ; Bochet 2007) a permis de définir certains paramètres demandés en entrée du modèle (Tableau 14). Les deux dernières colonnes du tableau présentent les paramètres des deux enherbement-type utilisés sur la période automne-hiver et sur le printemps.

Tableau 14: Paramètres des enherbements types. Tg : température de germination ; Tb : température de base ; $\theta(\psi_{min})$: humidité du sol minimale pour germination ; θ_{ht} : temps hydrothermal ; ψ_{min} : potentiel hydrique du sol minimal pour germination ; RGR : relative growth rate (taux de croissance relatif) ; LAR : leaf area ratio.

Paramètres	Crepis sancta	Diplotaxis erucoides	Geranium rotundifolium (moyenne)	Calendula arvensis	Poa annua	Enh Automne-hiver	Enh Printemps
Tg (°C)	0	10	-0,2	6	7	2,914	5,422
Tb	0	10	0	6	1,5	1,84	3,435
$\theta(\Psi_{min})$	0,345	0,345	0,345	0,345	0,345	0,345	0,345
θ_{ht}	24	28,68	48,08	48,09	91,56	44,3426	61,55115
Ψ_{min} (Mpa)	-1,2	-0,615	-1,60	-0,05	-0,522	-0,91445	-0,672915
RGR (1/EDD)	0,027	0,016	0,02	0,02	0,017	0,02234	0,01835
LAR (m ² leaf/g MS)	0,024	0,02	0,02	0,029	0,028	0,0247	0,025255

3.1.4.3 Le modèle de croissance de l'herbe sous OpenFLUID

Les études des dynamiques de population de la végétation spontanée en milieu cultivé et les modèles qui sont proposés dans ce cadre ont généralement 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 en général sur des bases de données qui ne sont pas accessibles pour l'utilisateur du modèle (Pare, 2007). Quelques modèles de type mécaniste, comme ALOMYSIS (Colbach et al., 2006), qui intègrent bien les facteurs climatiques sur le développement des plantes herbacées, utilisent de très nombreux paramètres et ont donc été développés pour quelques espèces modèles (Paré, 2007). C'est pour cet ensemble de raisons, qu'un travail original de modélisation adapté à nos objectifs et contexte a été initié par une thèse (Paré, 2011) et s'est poursuivi et développé dans le cadre du projet SP3A.

Trois phases peuvent être distinguées dans le développement des plantes: **l'émergence, la croissance et la sénescence**. La phase de sénescence a été prise en compte pour la modélisation du bilan hydrique mais elle n'a pas été prise en compte pour la mise en œuvre du modèle de croissance de l'herbe sous OpenFLUID.

a. L'émergence

L'émergence se décompose en 3 étapes : i) la levée de dormance, ii) la germination et iii) la croissance des premiers organes avant émergence. L'humidité du sol est prise en compte.

Pour modéliser la levée de dormance des règles expertes ont été choisies. A l'automne, les graines commencent à germer après le premier événement pluvieux dépassant 30 mm en 36h. Au printemps les graines commencent à germer après le 1^{er} février dès qu'il y a une destruction du couvert végétal (désherbage chimique ou mécanique).

La germination est modélisée à partir du temps hydrothermal (θ_{HT}) qui est une extension du concept de somme de température (Gummerson, 1986). Le temps hydrothermal prend en compte la température (T) et le potentiel hydrique (ψ) au-dessus de seuils qui sont spécifiques des plantes.

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

Le nombre de graines qui germent chaque jour dépend d'une loi de probabilité fonction du temps hydrothermal. Pour un jour t , numéroté à partir de la levée de dormance, on obtient une proportion de graines germées g_t , avec le probit étant l'inverse de la fonction de distribution cumulative normale (Bradford, 1995).

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

La croissance des premiers organes n'est pas modélisée. Le seul impact de cette phase est la mortalité. Pour éviter de modéliser la mortalité au cours de toute la phase d'émergence des graines, on considère que le stock de départ est égal au nombre de plantes observées finalement.

b. La croissance

La modélisation de la croissance (Paré, 2011), 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 germination, le paramètre climatique 'potentiel hydrique du sol', est remplacé par le rayonnement qui influe sur la photosynthèse.

C'est le cumul de degrés et de rayonnement au-dessus de seuils caractéristiques de chaque plante qui permet de déterminer la croissance. Le temps hydrothermal est traduit ici par le concept de

degrés-jours effectifs (EDD). Dans le calcul de l'EDD, la température ou le rayonnement sont limitant et le résultat ne dépasse pas le plus limitant.

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

T est la température moyenne de l'air, T_b la température de base pour la croissance, I le flux incident journalier de radiation photosynthétique active, q un coefficient de pondération de l'influence de la lumière relativement à celle de la température et ϕ un facteur de l'efficacité de l'interception de la radiation par unité de surface de feuille.

On calcule ensuite la croissance en masse de la plante en partant de la masse initiale de la graine. Ce calcul est une fonction exponentielle. Le poids sec est w, le poids sec initial à l'émergence w_0 et RGR le taux de croissance relatif.

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

Le modèle fonctionne par itération, à chaque pas de temps, il calcule l'augmentation de poids de la plante puis à partir de ce poids le nouveau couvert végétal et ainsi de suite. On a donc à chaque pas de temps le calcul de la couverture végétale de chaque graine qui a germé. Pour avoir la couverture végétale totale on multiplie par le nombre de graines de la cohorte, on somme la couverture végétale de chaque cohorte et de chaque espèce. Dans le cadre de SP3A, on ne considère qu'une espèce d'herbe. Une des limites de ce modèle de croissance résulte de la non prise en compte de l'humidité.

c. Synthèse

Un modèle de développement d'un couvert herbacé plurispécifique, après travail du sol ou désherbage chimique, a été développé spécifiquement durant le projet. Il constitue le second sous-modèle constituant le modèle d'évolution des états de surface présenté au §3.3 et mis en œuvre dans la partie 4 au §2.5.

Le modèle repose d'abord sur le calcul du nombre de graines qui germent chaque jour en fonction de l'état hydrique du sol et des sommes de température subies. Ensuite l'augmentation du poids sec et de la couverture végétale de chaque cohorte journalière de graines germées est calculée en fonction de paramètres des espèces concernées et des conditions météorologiques depuis la germination. Ceci permet d'estimer l'évolution du degré de couverture du sol par les adventices et de simuler le changement d'état de surface et donc de conductivité hydraulique de l'horizon de surface quand le degré de couverture dépasse 50 %.

Pour la modélisation du bilan hydrique à l'aide du modèle WaLIS (voir ci-dessous), ce modèle de développement du couvert herbacé spontané a été complété en prenant en compte une phase de sénescence.

3.2 Impact des itinéraires techniques sur le fonctionnement hydrique et azoté de la parcelle agricole et rendements associés

3.2.1 Démarche de modélisation

L'impact des itinéraires techniques sur le fonctionnement hydrique et azoté des parcelles viticoles et leurs conséquences en termes de perte de rendement ont été évalués par expérimentation virtuelle, sur cinq parcelles correspondant aux cinq types de sol rencontrés sur le bassin versant (Figure 22).

Le modèle Dhivine indique notamment en fonction des stratégies et du climat, les itinéraires d'entretien des sols (travail du sol et désherbage chimique). L'estimation des pertes de rendement sous l'effet des différentes modalités de gestion des sols déterminées par Dhivine, a été réalisée par expérimentation virtuelle (WaLIS et bilan d'azote).

Les simulations de bilan hydrique des parcelles viticoles enherbées prennent en compte les dynamiques de croissance de l’herbe en accord avec l’itinéraire technique de la parcelle, pour un climat donné. Les niveaux de stress hydrique et azoté sont ensuite intégrés comme facteurs de réduction des rendements objectifs déclarés par les viticulteurs gérant les parcelles étudiés.

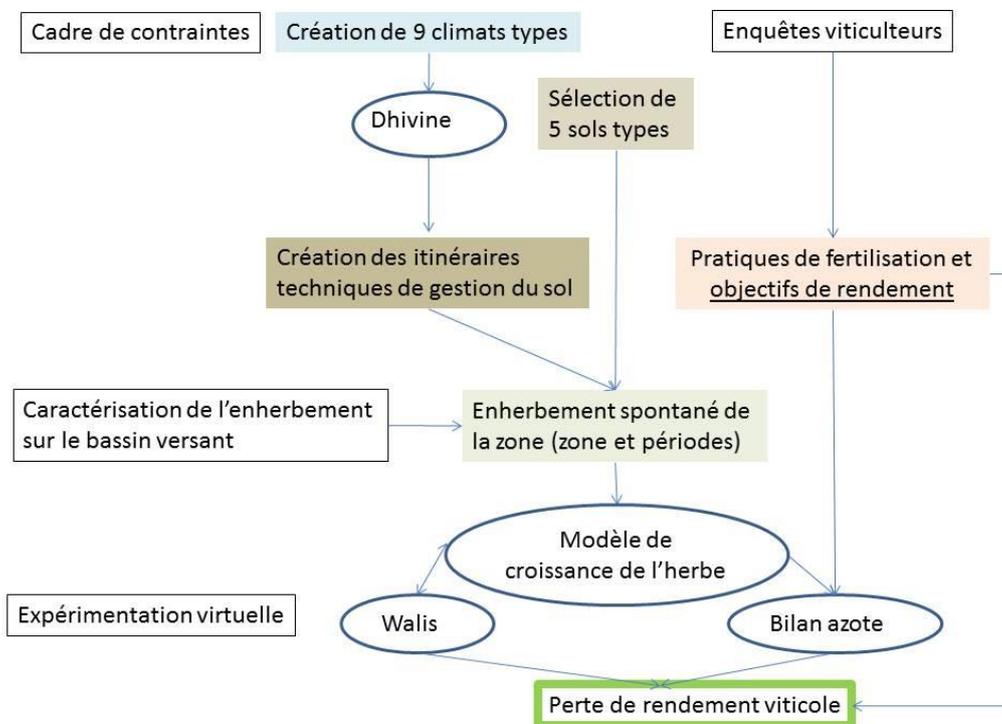


Figure 22: Démarche d’estimation de la perte de rendement viticole, sur cinq parcelle types pour les neuf climats types, à l’échelle du bassin versant. En ovale, figurent les simulateurs

3.2.2 Présentation du modèle WaLIS

Le modèle WaLIS (Celette et al., 2010) est un modèle programmé sous R, conçu pour la simulation de bilans hydriques sur parcelles de vigne enherbée (Figure 23).

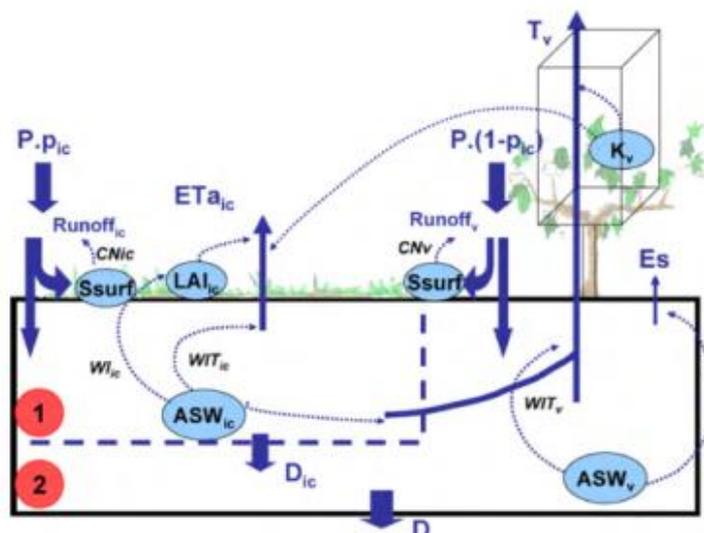


Figure 23: Représentation du bilan hydrique sur vigne enherbée. Le compartiment 1 est dédié aux racines de l’herbe et de la vigne, le compartiment 2 n’est accessible qu’aux racines de la vigne. ASW_{1c} et ASW_v représentent l’eau disponible pour l’herbe et la vigne, respectivement ; D_{1c} : drainage d’eau du compartiment 1 vers le compartiment 2 ; D : pertes d’eau par drainage ; T_v : transpiration de la vigne ;

ETa_c : évapotranspiration du couvert végétal ; Es : évaporation du sol nu ; LA_{ic} : LAI du couvert ; K_v : Coefficient d'interception lumineuse de la vigne ; S_{surf} : état de surface du sol jouant sur le ruissellement (Runoff) ; P : précipitations ; pic : proportion de sols enherbée. Source : Celette et al., 2010

Il simule l'évolution des réserves hydriques du sol (ASW, Available Soil Water) en fonction de variables climatiques (température, pluie, ETP) et de paramètres liés à la parcelle : date de débourrement et d'arrêt de transpiration de la vigne, K_{max} de la vigne, caractéristiques des sols et de l'enherbement, paramètres de ruissellement et d'évaporation du sol. Dans le modèle WaLIS, la vigne et l'herbe possèdent chacune un « réservoir » d'eau dans les sols, qui est rempli via l'infiltration de la pluie et vidé par la transpiration des plantes et l'évaporation du sol. Ce réservoir, appelé TTSW, est borné par l'humidité maximale que peut supporter le sol (capacité au champ), et par l'humidité minimale à laquelle la plante parvient à prélever l'eau du sol (lorsque la conductance stomatique $g_s = 0$). Le nombre de flux est limité dans WaLIS, ainsi les remontées capillaires ne sont pas simulées.

Le modèle produit des variables de sortie comme par exemple la FTSW, rapport entre l'ASW et la TTSW (Sinclair & Ludlow 1986 ; Pellegrino 2004), l'ETR de l'herbe, le K_v et le potentiel de base de la vigne, le LAI de l'herbe.

3.2.3 Calcul des paramètres de l'enherbement pour WaLIS

La prise en compte du couvert spontané a été simplifiée dans WaLIS (Celette et al., 2010). On considère un couvert unique moyen, regroupant les caractéristiques de l'enherbement hivernal et printanier.

Les variables d'entrée du modèle de bilan hydrique sont décrits dans le Tableau 15 ci-dessous.

Le modèle DHIVINE ne simulant pas de tontes, mais seulement du désherbage mécanique ou chimique, les paramètres liés à la tonte de l'herbe n'ont pas été pris en compte. Le LAI initial a été fixé à 0, afin que le modèle WaLIS simule la levée d'un couvert non établi en début de simulation. La date de levée a été fixée au 1^{er} septembre, date du début de la simulation. Enfin, l'indice de nutrition azotée "INN" n'a pas été changé par rapport aux précédentes utilisations et validations du modèle, avec une valeur de 0,3. Les autres paramètres ont été calculés, pour certains à partir des variables d'entrée du modèle DHIVINE.

Tableau 15: Paramètres WaLIS propres à l'enherbement

Nom des paramètres	Signification
"levée"	Date de levée du couvert
"inn"	Indice de nutrition azotée de l'herbe
"herblairate"	Taux de croissance du LAI du couvert
"LA _l init"	LAI initial de l'enherbement
"LA _l res"	LAI résiduel après une tonte
"LLS _{min} "	Cumul de degrés jours induisant l'entrée en sénescence du couvert
"LA _l tonte"	LAI à partir duquel se déclenche la tonte de l'herbe
"dtonte"	Date(s) de tontes du couvert
"FTSW _{regul} LAI"	Seuil de FTSW en dessous duquel l'herbe régule son LAI
"FTSW _{regul} tr"	Seuil de FTSW en dessous duquel l'herbe régule sa transpiration

3.2.3.1 LAI rate ou taux de croissance du LAI

Les formalismes de croissance de l'herbe issus du modèle de croissance de l'herbe (Pare, 2011) décrits ci-dessous ont permis de déterminer ce paramètre. La germination ayant lieu avant le

développement végétatif de l'herbe (croissance des feuilles notamment), seul le processus de croissance a été pris en compte dans le calcul du LAI rate.

Le modèle utilisé est un modèle de conductance pour la croissance d'un couvert spontané (Benjamin & Park, 2007) : la croissance des plantes dépend d'un paramètre appelé Effective Day Degrees (EDD, degrés jours effectifs), qui prend en compte un cumul de température et de radiation. Le couvert végétal a été considéré comme « monospécifique » pour faciliter le travail de modélisation de la croissance de l'herbe : les paramètres de ce couvert sont une moyenne des paramètres trouvés pour chacune des espèces mentionnées dans les Tableaux 12 et 13, pondérés par la proportion de chaque espèce dans l'enherbement type.

La croissance de l'herbe est une fonction exponentielle : $\ln(w) = \ln(w_0) + RGR \sum EDD$

Avec w le poids sec (g), w_0 le poids sec initial à l'émergence et RGR le taux de croissance relatif du couvert.

Les EDD se calculent de la manière suivante : $EDD = \frac{1}{[(T-T_b)]^{-1+s_z f_z l^{-1}}$

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 ($m^2 leaf g^{-1} total dry weight$)

T est la température moyenne journalière, T_b la température de base du couvert, et l la PAR (Photosynthetically Active Radiation) journalière. $A = 0,035$ et $k = 0,62$.

Les équations et explications ci-dessus sont issues de la thèse de Pare (2011), à partir des travaux de Benjamin et Park (2007), et sont utilisées dans le cas d'une simulation d'un couvert à canopée « ouverte ».

Ces formules sont implantées dans un module de simulation de croissance de l'herbe, sous la plateforme OpenFLUID. La documentation de ce module a également été consultée afin de déterminer la variable la plus proche du LAI du couvert. Une variable appelée S_1 y est décrite comme étant semblable à un LAI, avec **SI = LAR x w**.

Une courbe de croissance de ce paramètre a été tracée pour chaque climat, du 1/09 jusqu'à un maximum pour la valeur de S_1 atteint autour du 30/09 suivant les situations (Figure 24). Le S_1 augmentant très lentement en début de croissance (valeurs inférieures à 10^{-3}), seuls les 10 derniers jours (avant l'atteinte du S_1 maximum) ont été tracés.

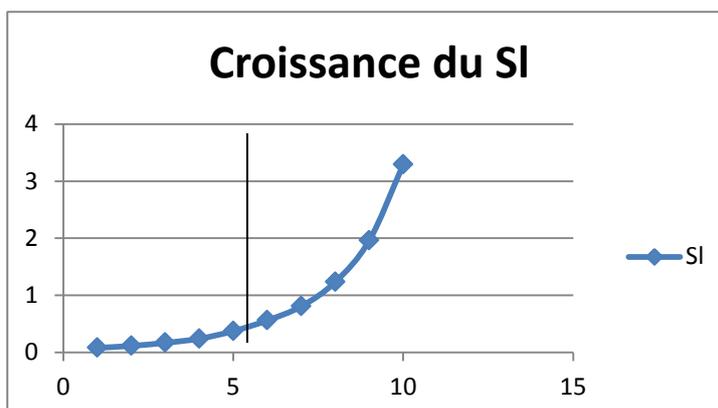


Figure 24 : Croissance du S_i (LAI, Leaf Area Ratio) de $j=20$ à $j=29$ en climat « SS »

La courbe a été divisée en deux périodes : une période de croissance modérée (les 5 premiers points) et une période de croissance plus rapide (5 derniers points). Une régression linéaire a ensuite été réalisée pour chaque période afin de déterminer la pente correspondant au taux de croissance du S_i . Enfin, une comparaison entre le taux de croissance trouvé et le taux de croissance de la fétuque (valeur présente dans le modèle WaLIS original) a été effectuée afin de ne garder les valeurs les plus cohérentes.

Finalement le taux de croissance conservé pour les simulations de bilan hydrique est celui de la deuxième période (régressions construite sur les 5 derniers points), et correspond à une moyenne des taux trouvés pour chaque climat.

A noter : le module de croissance de l'herbe est réinitialisé à chaque destruction par travail du sol ou désherbage chimique, tel que programmé par le modèle Dhivine.

3.2.3.2 LLSmin ou Leaf Lifespan

La littérature (Kazakou et al., 2007 ; Shleip et al., 2012 ; Al Haj Khaled et al., 2005) renseigne plusieurs traits fonctionnels de différentes plantes, dont le LLS. Ce paramètre est important pour la simulation de la croissance d'un couvert végétal, car il permet de prendre en compte la sénescence de l'herbe, lorsque les plantes atteignent un certain cumul de degrés jours. Sans ce paramètre, la simulation de la croissance de l'herbe est erronée. Les travaux de recherche n'ont pas été effectués sur tous les végétaux présents dans les Tableaux 16 et 17. Certaines plantes ont donc été considérées comme ayant des traits fonctionnels identiques à une autre plante³ (même espèce généralement), dont les traits sont présents dans la bibliographie.

Tableau 16: Résumé des valeurs de LLS trouvées dans la bibliographie. La valeur trouvée dans l'article de Shleip est une moyenne (réalisée par l'auteur) sur plusieurs espèces prairiales aux LLS proches.

Plante présente dans l'enherbement	Plante "considérée comme proche"	LLS	Bibliographie correspondante
Crepis sancta	Crepis foetida	405	Kazakou et al., 2007
Diploaxis erucoïdes	-	463	Shleip et al., 2012
Geranium rotundifolium	-	293	Kazakou et al., 2007
Calendula arvensis	Crepis biennis	1012	Al Haj Khaled et al., 2005
Poa annua	Bromus madritensis	500	Kazakou et al., 2007

Une moyenne de ces valeurs est réalisée pour chaque période (automne/hiver et printemps/été) et entre les périodes pour obtenir un LLS unique pour l'enherbement type.

3.2.3.3 Seuils de FTSW

Afin de déterminer les deux seuils de FTSW (régulation de la transpiration et du LAI), le trait fonctionnel LDMC (Leaf Dry Matter Content) a été utilisé⁴. En effet, la valeur du LDMC d'une plante donne une idée de la teneur en eau du végétal : un LDMC élevé témoigne d'une faible teneur en eau dans la plante dont on peut déduire une certaine sensibilité à la sécheresse. A l'opposé, des LDMC faibles sont trouvées chez des espèces moins sensibles aux stress hydriques.

³ A dire d'expert (Elena Kazakou)

⁴ Après avis d'expert (Elena Kazakou)

Les valeurs de LDMC trouvées (Tableau 17) pour l'enherbement type sont issues des travaux de Kazakou et al., 2009, Al Haj Khaled et al., 2005 ainsi que de la base de données TRY (Plant Trait Database).

Tableau 17: Valeurs de LDMC des espèces constituant l'enherbement type.

Plante présente dans l'enherbement	Plante "considérée comme proche"	LDMC (mg/g)	Bibliographie correspondante
Crepis sancta	Crepis foetida	144,9	Kazakou et al. 2009
Diptotaxis erucoïdes	-	124	TRY Database
Geranium rotundifolium	-	164,4	Kazakou et al. 2009
Calendula arvensis	Crepis biennis	128	Al Haj Khaled et al. 2005
Poa annua	Bromus madrilensis	229,4	Kazakou et al. 2009

De même que pour le LLS, un LDMC moyen unique est calculé pour l'enherbement type sur le bassin versant. En comparant avec la fétuque élevée (LDMC = 208, TRY Database), les FTSW seuils du couvert pour la simulation sont calculés : **0,7** pour la régulation du LAI et **0,5** pour la régulation de la transpiration.

Concernant la recherche des caractéristiques de l'enherbement pour renseigner les paramètres pour le modèle WaLIS, certaines approches peuvent être critiquées. Les formalismes utilisés pour la détermination du taux de croissance du LAI, et notamment les formules de calcul du S_i (le « LAI » utilisé pour les simulations) sont adaptés à une espèce unique, formant plusieurs cohortes végétales au sol. L'idée est de réaliser les calculs pour chaque espèce, et de sommer les calculs par rapport au nombre de cohortes puis d'espèces en présence, en pondérant par la densité de graine de chaque espèce sur la parcelle. Dans notre cas, nous avons effectué un seul et unique calcul, en utilisant les paramètres de notre couvert moyen (RGR et LAR notamment), le SI calculé n'a donc pas le même sens que celui calculé par Nakié Paré dans sa thèse, ce qui pose des questions quant à son utilisation dans le modèle WaLIS.

De même, les seuils de FTSW régulant la transpiration et le LAI du couvert herbacé ont été définis en comparant les LDMC de la fétuque (espèce programmée dans le modèle WaLIS original) et de l'enherbement type. Les seuils ont été calculés au prorata du LDMC de la fétuque, et ne proviennent pas de travaux de recherche ou d'observations de terrain. Leurs valeurs restent donc à valider par des mesures effectuées sur ces espèces.

3.2.3.4 Adaptation du modèle WaLIS

WaLIS étant conçu pour un enherbement semé de fétuque élevée, le modèle a été adapté à la croissance d'un enherbement spontané, grâce à la caractérisation de ce dernier sur le terrain et à la recherche des paramètres adaptés au modèle (voir « Caractérisation de l'enherbement »).

Des modifications du code ont également été effectuées :

- Le module de gestion du format csv pour l'import des données climatiques a été modifié afin qu'il permette d'importer également les variables « Pluie infiltrée », « proportion enherbée », « TTSW vigne » et « TTSW herbe » au pas de temps journalier. Les fichiers météo ne contiennent donc plus seulement des données climatiques, mais également les paramètres décrits ci-dessus.
- Le ruissellement a été désactivé, et les codes permettant le calcul de la pluie infiltrée ont été modifiés afin d'importer directement ce paramètre depuis le fichier météo.
- Le noyau du modèle a été modifié afin de changer la prise en compte des paramètres « p », « TTSWv » et « TTSWh » : ces paramètres étaient fixés et provenaient du fichier « paramètres »

(annexe VI « Scripts WaLIS »), il a fallu programmer la prise en compte de ces paramètres au pas de temps journalier en les important depuis le fichier « météo ».

3.2.3.5 Types de sols et réserves hydriques

Les tableaux 18 et 19 ci-dessous illustrent la diversité des situations simulées en termes de sols, climats et itinéraires techniques appliqués sur les parcelles.

Tableau 18: TTSW totale calculée pour chaque parcelle simulée.

Parcelle	Sol	Profondeur (m)	H _{CC} g/cm3	H _{PF} g/cm3	Δ L/m3	TTSW _{tot} (mm)
RT054_1	Alluvial	2	0,219	0,1005	118,50	237
RT075_38	Fersiallitique	1,1	0,23205	0,1071	124,95	137
RT033_20	Molasse	1	0,1848	0,1034	81,40	81
RT052_35	Pierreux	0,5	0,1512	0,0846	66,60	33
RT067_22	Transition	1	0,26752	0,1792	88,32	88

Tableau 19: TTSW de l'herbe et de la vigne pour chaque parcelle simulée, en fonction de la proportion enherbée de la parcelle. Sur fond vert : TTSW de l'herbe (TTSWh) ; sur fond blanc : TTSW de la vigne (TTSWv) ; p : proportion enherbée.

Parcelle	TTSWh p=1	TTSWh p=0.66	TTSWh p=0.33	TTSWv p=1	TTSWv p=0.66	TTSWv p=0.33
RT054_1	59	39	20	178	198	217
RT075_38	62	41	21	75	96	117
RT033_20	41	27	13	41	55	68
RT052_35	33	22	11	0	11	22
RT067_22	44	29	15	44	59	74

Il est intéressant de remarquer que les valeurs de TTSW sont relativement faibles dans nos simulations, notamment pour les parcelles de type « Molasse », « Pierreux » et « Transition ». Elles correspondent souvent à des sols peu profonds et/ou très caillouteux : le risque de stress hydrique est plus important dans ces situations.

3.2.4 Bilan azoté simplifié des parcelles

A partir des analyses de sol réalisées sur les parcelles de la simulation, ainsi que des informations obtenues sur les objectifs de rendement et les pratiques de fertilisation des vigneron exploitants ces parcelles, un bilan azoté a été réalisé en tenant compte des hypothèses suivantes : les vignes sont en cépage Syrah, avec un objectif de rendement réaliste renseigné par l'enquête ou en rendement limité (45 hl/ha) lorsque l'on ne connaît pas les rendements du viticulteur propriétaire de la parcelle.

3.2.4.1 Coefficient de minéralisation potentielle

La minéralisation potentielle de l'azote dépend des propriétés physico-chimiques ainsi que des conditions de température et d'humidité du sol. Un coefficient (K2) peut ainsi être calculé, et permet de définir la minéralisation potentielle annuelle d'une parcelle. La formule du K2 est la suivante :

$$K2 = \frac{1200}{(A + 200) \times (0.3 \times Ca + 200)}$$

Avec K2 le coefficient de minéralisation potentielle annuelle d'azote, A la fraction d'argiles du sol, Ca la quantité de calcaire du sol, exprimés en pourcentage, d'après Rémy et Marin-Lafèche, 1976

Le bilan azoté est réalisé sur 15 cm de sol. à partir du taux d'azote fourni par les analyses. La minéralisation est calculée de la manière suivante :

$$Mn = K2 \times Msol \times N$$

Avec Msol la masse de sol de la surface considérée, N le taux d'azote du sol déterminé à l'analyse, en mg/Kg de terre fine.

3.2.4.2 Exportations d'azote

L'azote exporté de la parcelle provient ici d'une unique source, les grappes. En effet, les autres organes (feuilles, sarments...) sont considérés comme restant sur la parcelle, ce qui est cohérent avec les pratiques des viticulteurs, et restituant l'azote immobilisé au sol. La fraction d'azote de la vigne immobilisé dans les grappes est de 0,55 % (sur Syrah), (Guilpart 2014).

Ces quantités variant d'un cépage à un autre, nous avons considéré que les parcelles étaient cultivées en Syrah pour nos calculs. De plus, ce cépage est majoritairement cultivé dans le département (observatoire viticole de l'Hérault), et plus particulièrement dans les communes de Murviel-lès-Béziers, Causses-et-Veyran et St Nazaire de Ladarez puisqu'il représente respectivement 24, 25 et 37 % des surfaces de vignes cultivées dans ces communes (observatoire viticole de l'Hérault).

Les quantités apportées à la parcelle (minéralisation + fertilisation) ont été comparées aux exports, afin d'évaluer les risques de carence de la vigne.

3.2.4.3 Fertilisation

Les informations concernant la fertilisation azotée des parcelles (dose, fréquence, forme) sont issues des enquêtes de Diane Chavassieux (2013).

3.2.4.4 Pondération de la minéralisation par l'humidité du sol

L'herbe ne concurrence pas seulement directement la vigne par ses prélèvements d'eau et d'azote, mais elle peut provoquer également une baisse de la minéralisation de l'azote à travers la baisse de l'humidité du sol (Celette et al., 2009). Nous avons ainsi calculé de nouveaux taux de minéralisation de l'azote, en corrigeant le K2 par des facteurs de température et d'humidité. Ces facteurs ainsi que les taux de minéralisation ont été calculés sur des moyennes annuelles de teneur en eau des sols et de température.

Le facteur de température $f(T)$ est une fonction exponentielle (Recous et al, 1995 ; Garnier et al, 2001) :

$$f(T) = e^{[bt(T-Tref)]}$$

Avec $bt = 0,115 \text{ K}^{-1}$ (Garnier et al, 2001), T la température moyenne et Tref une température de référence. Tref = 15°C d'après Celette et al. (2009).

Le facteur d'humidité est de la forme suivante (Mary et al, 1999) :

$$f(\theta) = (1 - c) \frac{\theta - \theta_{pwp}}{\theta_{fc} - \theta_{pwp}} + c$$

Avec θ l'humidité moyenne annuelle du sol, θ_{PWP} l'humidité au point de flétrissement permanent, et θ_{FC} l'humidité du sol à la capacité au champ, et c le taux de minéralisation au point de flétrissement permanent relatif au taux de minéralisation maximal. $c = 0,2$ comme proposé par Celette et al., (2009). L'humidité annuelle moyenne des sols a été déterminée d'après l'ASWtot annuelle moyenne des parcelles.

La formule du taux de minéralisation annuel corrigé est la suivante :

$$Mn = K2 \times f(T) \times f(\theta)$$

3.2.4.5 Estimation de la compétition directe – Croissance du LAI

Enfin, nous avons observé l'évolution du LAI du couvert herbacé simulé dans le modèle WaLIS, afin d'observer les périodes de compétition directe entre la vigne et l'herbe, pour la ressource azotée. En effet, la croissance de l'herbe augmente ses prélèvements d'azote dans le sol, et suivant la période pendant laquelle l'herbe effectue ces prélèvements, les effets sur le développement de la vigne peuvent être plus ou moins néfastes.

Nous avons donc comparé les périodes de forte croissance du couvert végétal avec les périodes de prélèvement d'azote par la vigne, d'après les travaux de Wermelinger, 1991. La comparaison nous permet ici également de déterminer les périodes de compétition entre les deux espèces pour l'azote, et ses effets sur l'élaboration du rendement de la vigne.

3.3 Impact des itinéraires techniques sur les flux à l'échelle du BV

3.3.1 Démarche

La démarche suivie consiste à évaluer les 4 stratégies envisagées en comparant par modélisation, sur le bassin du Rieutort et pour l'ensemble de 9 années climatiques test, les impacts sur les flux de ruissellement des différentes distributions spatiales des modalités d'entretien qui ont été associées à ces stratégies par simulation dans la section précédente.

Cette démarche d'évaluation environnementale des stratégies repose sur le raisonnement suivant:

- En contexte méditerranéen viticole, les flux de ruissellement de surface sont les principales voies de transfert des pesticides vers les eaux de surface. Ils constituent donc un critère de comparaison de l'impact environnemental de stratégies de gestion agronomique des bassins versants.
- Dans le cas des herbicides ce sont les modalités d'entretien du sol (désherbage chimique et/ou travail du sol) qui sont le principal facteur de contrôle de la contamination des eaux (Louchart et al., 2001a ; 2001b). En effet ces modalités déterminent la quantité de molécules épandues à l'échelle parcellaire, et donc la pression polluante sur le milieu, et influencent la vulnérabilité du milieu en favorisant ou non des états de surface du sol ruisselants.
- L'analyse de l'influence sur les flux de ruissellement de la distribution spatiale des modalités d'entretien du sol correspondant aux stratégies envisagées permet donc de comparer l'impact environnemental de ces dernières.

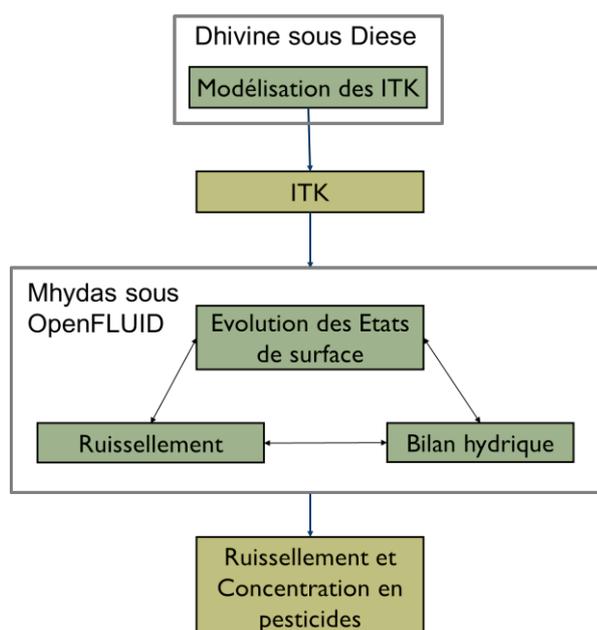


Figure 25: Évaluation environnementale des stratégies normatives

Pour permettre la simulation des flux de ruissellement en fonction de la distribution spatiale des itinéraires techniques simulés par Dhivine une modélisation biophysique spécifique a été développée.

On voit son insertion dans l'ensemble de la démarche d'évaluation environnementale des stratégies dans la Figure 25. Cette modélisation biophysique n'est pas couplée au modèle Dhivine mais simplement chainée tant au plan conceptuel qu'informatique. Il n'y a donc pas de possibilité de rétro-action entre les deux modèles. Dans le futur, une amélioration souhaitable de la démarche sera la mise en place d'un vrai couplage afin de pouvoir mieux simuler l'influence des états hydriques du milieu sur les décisions d'opérations culturales.

3.3.2 La modélisation biophysique développée

3.3.2.1 Caractéristiques générales

La modélisation biophysique, développée sur la plateforme de modélisation OpenFLUID (Fabre et al., 2010),

- considère en entrée :

- les calendriers culturaux, simulés avec le modèle Dhivine, relatifs aux opérations d'entretien du sol,
- les caractéristiques climatiques des années test,
- les caractéristiques du milieu physique : propriétés des sols, parcellaire cultural et topologie du réseau hydrographique, présentés par les figures 4 et 5 (partie 1),

- et comprend

- une modélisation de l'évolution des états de surfaces et de l'infiltrabilité des sols en fonction de la nature du sol, des opérations d'entretien du sol, de la croissance de la végétation et de l'énergie cinétique de la pluie, qui a été élaborée au cours du projet
- et couplée au modèle hydrologique distribué MHYDAS (Moussa et al., 2002) qui, dans sa version la plus récente (2014), simule le bilan hydrique et le ruissellement en eau et pesticides des parcelles agricoles ainsi que les écoulements résultants dans le réseau hydrographique auquel sont connectées les parcelles.

3.3.2.2 L'organisation de la modélisation et ses différentes parties

La figure 26 représente le schéma conceptuel de la modélisation. Seules les variables les plus importantes y sont représentées.

Le modèle peut être subdivisé en trois parties :

- la modélisation de l'évolution de l'état de surface
- la modélisation hydrologique et le transfert des pesticides
- la modélisation du bilan hydrique

Chaque partie du modèle comprend plusieurs simulateurs (les rectangles verts) qui interagissent entre eux et avec le reste du modèle, nécessitent des informations en entrée et renseignent des variables en sortie (ovales jaunes).

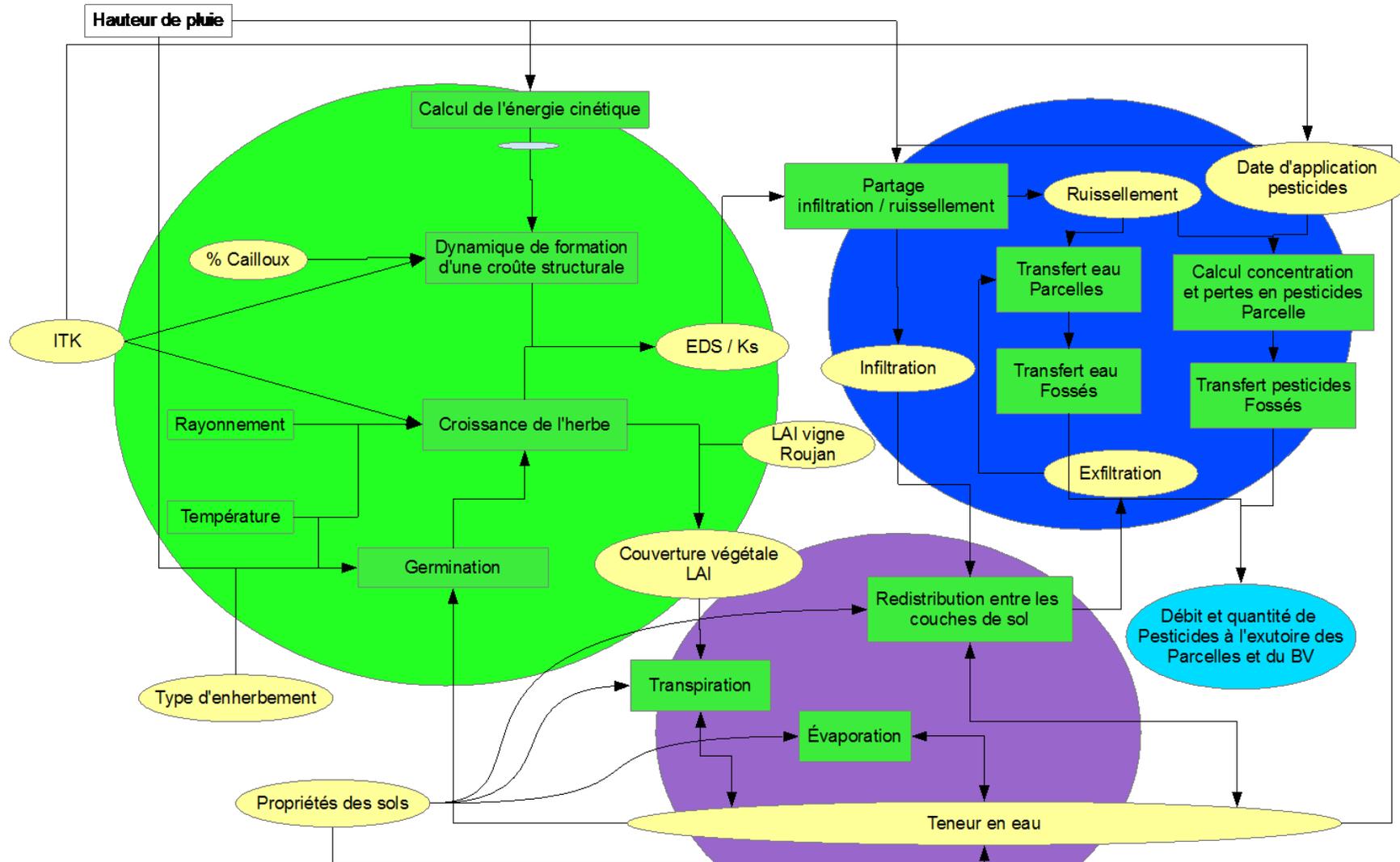


Figure 26: Schéma conceptuel de la modélisation biophysique. En carré vert les simulateurs, en ovales jaunes les variables, en ovale bleu le résultat, en rond vert, bleu et violet les 3 parties distinguables du modèle. Dans cette figure, les noms des simulateurs ont été choisis pour être explicites mais ne correspondent pas aux noms des simulateurs proposés sur la plateforme OpenFLUID. Les noms officiels des simulateurs sont dans le tableau en annexe A3

a. La modélisation de l'évolution des états de surface

Cette modélisation a été spécifiquement développée durant le projet. Ses principes et les observations de terrain qui en sont à l'origine sont détaillés dans le paragraphe 3.1. Pour mémoire, elle comprend deux sous-modèles i) la modélisation de la formation d'une croûte structurale après un travail du sol et ii) la modélisation du développement d'un couvert herbacé après travail du sol ou désherbage chimique.

On notera que la simulation de l'évolution des états de surface du sol varie entre rang et inter-rang si ceux-ci subissent des pratiques différentes. Pour certaines modalités d'entretien du sol, on distingue deux types d'inter-rang en raison d'entretiens de natures différentes. Une parcelle peut donc présenter jusqu'à trois sous-unités de simulation de l'évolution des EdS et des processus hydrologiques (bilan hydrique et ruissellement de surface).

b. La modélisation du bilan hydrique

Plusieurs processus simulés dépendent de la teneur en eau du sol (e.g. le partage infiltration / ruissellement, la germination), il est donc nécessaire de modéliser son évolution. A cet effet une simulation du bilan hydrique du sol sur le compartiment racinaire de la vigne et des adventices est effectuée. Les calculs sont effectués séparément aux échelles du rang et de l'inter-rang afin de prendre en compte les différences de végétation et d'états de surface résultant de la diversité des modalités d'entretien du sol. Le profil de sol est découpé en couches de calcul, dont les limites tiennent compte de celles des horizons de sol, afin de pouvoir représenter l'évolution du profil de teneur en eau du sol.

Pour le calcul du bilan hydrique, les processus suivants sont successivement modélisés à chaque pas de temps:

- L'évaporation

L'évaporation potentielle EP (m) au pas de temps t est calculée à partir de l'évapotranspiration de référence ET_0 (m) à t selon une analogie à la loi de Beer-Lambert:

$$EP(t) = ET_0(t) \cdot \exp(-\alpha \cdot LAI)$$

avec α le coefficient d'extinction de Beer-Lambert pour le couvert concerné et LAI son indice foliaire (m^2/m^2). Par souci de simplification, on considère que le LAI de la vigne est le même sur toutes les sous-unités de la parcelle, seul le LAI des adventices varie entre sous-unités en raison des différences possibles d'entretien du sol entre rang et inter-rang. Pour chaque sous-unité la valeur de LAI utilisée est la somme des indices foliaires de la vigne et des adventices présentes.

L'évaporation réelle, ER , est ensuite calculée suivant l'approche de van Keulen (1975),

$$\frac{ER(t)}{EP(t)} = a + b \cdot \exp\left(\frac{-c}{S_{0-20}(t)}\right)$$

avec $S_{0-20}(t)$ le stock en eau (m) de la couche 0-20 cm, et a et b des constantes. Sur la base des travaux de Trambouze (1996) sur parcelle de vigne dans des conditions proches de celles du site d'étude, on peut considérer que l'évaporation est fonction du stock dans les 20 premiers centimètres de sol.

Enfin, un nouveau stock et la teneur en eau associée de la couche 0-20 cm sont calculés :

$$S_{0-20}(t) = S_{0-20}(t-1) - ER(t)$$

$$\theta_{0-20}(t) = \frac{S_{0-20}(t)}{0.2}$$

avec $\theta_{0-20}(t)$ la teneur en eau de la couche 0-20 cm.

- La transpiration

Le flux de transpiration calculé de chaque sous-unité d'une parcelle comprend le flux de l'ensemble des plantes (vigne et adventices) de la sous-unité.

Le flux potentiel de transpiration TP (m) est estimé comme le complément de EP par rapport à ET_0 :

$$TP(t) = ET_0(t) - EP(t)$$

La transpiration réelle TR (m) est calculée en fonction du stock d'eau dans la zone racinaire et de la transpiration potentielle selon une fonction de type simple ratio:

$$\frac{TR(t)}{TP(t)} = d + e \cdot S^*(t)$$

avec $S^*(t)$ (-) le degré de saturation en eau de la zone racinaire à t , calculé à partir de sa teneur en eau, et d et e des constantes. Dans le cas de la culture de vigne, les observations de Trambouze et Voltz (2001) montrent que la majeure partie de l'extraction racinaire de la vigne dans des conditions standard s'étend jusqu'à 2 m de profondeur et varie peu entre rang et inter-rang pour les conditions de plantation de la plaine languedocienne. Nous avons donc considéré une zone racinaire de 2 m de profondeur pour toutes les sous-unités de calcul, rang et inter-rang. La transpiration calculée ainsi est répartie en des extractions racinaires différentes par couche de sol en fonction de l'épaisseur de ces dernières.

Enfin de nouvelles valeurs de stock et de teneur en eau des couches de calcul de la zone racinaire sont calculées :

$$S_i(t) = S_i(t - 1) - TR_i(t)$$

$$\theta_i(t) = \frac{S_i(t)}{Z_i^{sup} - Z_i^{inf}}$$

avec $S_i(t)$ le stock en eau de la couche i à t , $\theta_i(t)$ la teneur en eau de la couche i à t , $TR_i(t)$ la contribution à $TR(t)$ de la couche i à t , et $Z_i^{sup} - Z_i^{inf}$ l'épaisseur de la couche i .

- La redistribution entre les couches de sol

En fonction de l'état hydrique de chaque couche, une redistribution de l'eau par drainage entre couches est simulée. Ce calcul est fait couche par couche de sol suivant le concept de drainage libre formulé par Rambal et Cornet (1982) : la quantité d'eau qui dépasse la teneur en eau de la capacité au champ est supposée disponible pour le drainage. Le calcul de la quantité drainée effective, $H_{transf,i}$, tient compte également de la vitesse de transfert entre les couches selon l'équation suivante :

$$H_{transf,i}(t) = \frac{\Delta Z_i \cdot (\theta_i(t - 1) - \theta_{fc,i})}{TD_i}$$

avec $H_{transf,i}(t)$ (m) la quantité drainée par la couche i à t , ΔZ_i (m) l'épaisseur de la couche de sol i , $\theta_i(t-1)$ (-) la teneur en eau de la couche du pas de temps précédent, $\theta_{fc,i}$ (-) la teneur en eau de la couche i à la capacité au champ et TD_i (s^{-1}) le temps de drainage de la couche i , calculé selon la formule suivante :

$$\frac{1}{TD_i} = 1 - \exp\left(\frac{-K_{sat,i} \cdot \Delta t}{\Delta Z_i \cdot (\theta_{sat,i} - \theta_{air,i})}\right)$$

avec $K_{sat,i}$ la conductivité hydraulique à saturation de la couche i , $\theta_{sat,i}$ sa teneur en eau à saturation, θ_{air} sa teneur en eau après séchage à l'air, et Δt le pas de temps de calcul.

Ensuite, un nouveau stock de la couche concernée est recalculé par bilan:

$$S_i(t) = S_i(t - 1) + H_{transf,i-1}(t) - H_{transf,i}(t)$$

avec $S_i(t)$ le stock d'eau de la couche i au pas de temps t , $S_i(t-1)$ au pas de temps précédent, $H_{transf,i-1}(t)$ l'eau transférée de la couche supérieure vers la couche i à t .

Si la teneur en eau de la couche inférieure est supérieure à la teneur en eau à saturation, le transfert est limité à la place libérée au pas de temps en cours, suivant la formule suivante :

$$H_{transf,i-1}(t) = H_{transf,i}(t) - (S_i(t) - S_{sat,i})$$

avec $S_{sat,i}$ le stock en eau à saturation de la couche i . Pour la couche de surface, c'est l'infiltration qui constitue l'eau transférée depuis le haut. Si la teneur en eau de cette couche est supérieure à la teneur en eau à saturation, le surplus d'eau provenant de l'infiltration est rajouté au ruissellement estimé par la modélisation des écoulements de surface (voir plus loin).

c. La modélisation hydrologique du ruissellement en eau et pesticides

Cette modélisation vise le calcul des débits à l'exutoire des parcelles et du bassin versant et de la quantité d'eau et de pesticide ruisselés au cours d'un cycle cultural à ces mêmes échelles.

En terme de ruissellement d'eau la modélisation considère trois processus majeurs:

- i) le partage infiltration/ruissellement de la pluie sur les parcelles en fonction de la capacité d'infiltration et de l'humidité du sol des parcelles, et de leurs sous-unités le cas échéant,
- ii) la propagation du ruissellement du centre des parcelles vers une parcelle aval ou vers le réseau hydrographique,
- iii) la propagation des ruissellements des parcelles vers l'exutoire du bassin via le réseau.

Par souci de simplification et par insuffisance d'information sur le domaine souterrain sur le bassin du Rieutort, les échanges entre le réseau et les ressources en eau souterraines ne sont pas considérés dans les simulations menées. Cela peut provoquer une surestimation des flux d'eau à l'exutoire du bassin pour certains événements de crues et donc une surestimation des pertes en pesticides. Elles seront toutefois similaires pour toutes les stratégies étudiées et ne modifieront donc pas leur comparaison au plan environnemental. La description des modalités de simulation du ruissellement d'eau est détaillée dans plusieurs publications, notamment Moussa et al. (2002) pour l'ensemble du modèle MHYDAS. Nous ne les rappellerons donc pas ici sinon pour indiquer qu'en matière de partage infiltration-ruissellement c'est l'approche de Diskin-Nazimov qui a été retenue (Chahinian et al, 2005).

En terme de transfert d'herbicides, les modules de simulation spécifiques de Mhydas n'ont pas encore fait l'objet d'une publication détaillée. Nous en donnons donc ici les principes essentiels. Il convient de noter en premier que les modélisations correspondantes ne représentent que le transport en phase dissoute, qui est très fortement majoritaire à l'échelle annuelle pour les herbicides couramment appliqués en milieu viticole méditerranéen (pour le diuron par exemple, le transport par phase dissoute représente près de 90% du transfert total – données observatoire OMERE).

Les concentrations en herbicide des eaux de ruissellement sont estimées à l'aide d'une relation empirique fonction du temps passé depuis la dernière application. La relation est de nature exponentielle décroissante ainsi que le montrent les données pluriannuelles acquises sur le bassin de Roujan. Elle traduit le fait qu'à l'échelle annuelle le premier facteur d'évolution de la contamination des eaux de ruissellement est l'évolution des teneurs en pesticides dans la couche de surface du sol, elle-même sous la dépendance du processus de dégradation biologique des matières actives épandues.

Nous avons ajusté la relation exponentielle sur les données observées dans le cas du glyphosate durant 10 années de mesures entre 2001 et 2013 sur une parcelle du bassin versant de Roujan.

La relation ajustée est la suivante :

$$C_{moy} = 334,7e^{-0,056*t} + 8.7$$

avec C_{moy} ($\mu\text{g/l}$) la concentration moyenne du ruissellement sur un événement à l'exutoire de la parcelle, t le temps (j) et un coefficient de détermination R^2 égal à 0,79.

Ensuite le transfert dans le réseau de fossés jusqu'à l'exutoire est simulé par une approche de type onde cinématique en ne considérant que le processus de convection.

On obtient ainsi une estimation des concentrations et quantités de pesticides écoulées à l'exutoire du bassin versant qui sont utilisées comme indicateurs afin de comparer les stratégies entre elles.

d. Pas de temps de la modélisation

La majorité des processus représentés dans la modélisation biophysique sont simulés au pas de temps horaire. Cependant, certains simulateurs ont leurs propres pas de temps.

Ainsi, les simulateurs 'Germination' et 'Croissance de l'herbe' fonctionnent à un pas de temps supérieur, celui de la journée qui est le pas de temps auquel les concepts de modélisation de ces processus sont pertinents. Ces simulateurs permettent d'estimer une valeur journalière unique du LAI et du taux de couverture végétal du sol, qui sont donc considérés constants pour l'ensemble des 24 pas de temps horaires de la journée par les autres simulateurs.

Les simulateurs constitutifs de Mhydas peuvent fonctionner à des pas de temps inférieurs à l'heure mais fixes dans la version utilisée du modèle. Le pas de temps de la minute permettrait plus de précision, notamment en termes d'estimation des flux de ruissellement en fonction de l'intensité des pluies. Mais dans le cadre des simulations réalisées cela aurait un coût très important en temps calcul vu le nombre (4 stratégies) et la durée des simulations (9 années) à réaliser. Aussi, le pas de temps de simulation de Mhydas a également été fixé au pas de temps horaire, ce qui représente déjà avec les moyens de calculs mobilisés (9 cœurs de calcul sur un cluster) un temps de calcul de 32 h pour l'ensemble des simulations relatives aux 4 stratégies. Dans le futur, grâce à une nouvelle version d'OpenFLUID, version 2.0 qui permet de fonctionner avec des pas de temps variables, la précision des simulations pourra être améliorée sans augmentation importante du temps calcul.

Partie 4

Mise en œuvre des évaluations sur le bassin versant du Rieutort

1 Introduction

Après avoir présenté les modèles biophysiques utilisés pour l'évaluation des stratégies candidates, cette quatrième partie présente les résultats des évaluations mises en œuvre : i) par modélisation et ii) par les viticulteurs et plus précisément les évolutions envisagées ou envisageables par ces derniers.

2 Évaluation des stratégies normatives par modélisation

L'évaluation des stratégies par modélisation se décompose en cinq étapes successives.

- Dans un premier temps, afin de tester des situations de risque contrastées et typiques de la région, des climats types ont été élaborés à partir de données existantes (ORE OMERE, bassin versant de Roujan) ;
- Puis les modalités d'entretien du sol associées à chaque stratégie candidate, ont été réparties spatialement sur le bassin versant avec une résolution parcellaire, en fonction de contraintes de mise en œuvre de chacune des modalités d'entretien du sol ;
- Les itinéraires techniques résultant de la mise en œuvre des stratégies candidates ont ensuite été simulés avec le modèle Dhivine, sur l'ensemble des parcelles en vigne du BV ;

Les itinéraires techniques simulés ont servi de données d'entrée des modèles biophysiques pour évaluer les impacts :

- sur les stress hydriques et azotés et le rendement à l'échelle parcellaire sur les 5 grands types de sols du bassin versant ;
- sur les flux de ruissellement et de pesticides à l'échelle du bassin versant.

2.1 Définition de climats tests types

Les données météo pour la construction climats types proviennent de la station météo de Roujan et couvrent la période 1992-2013.

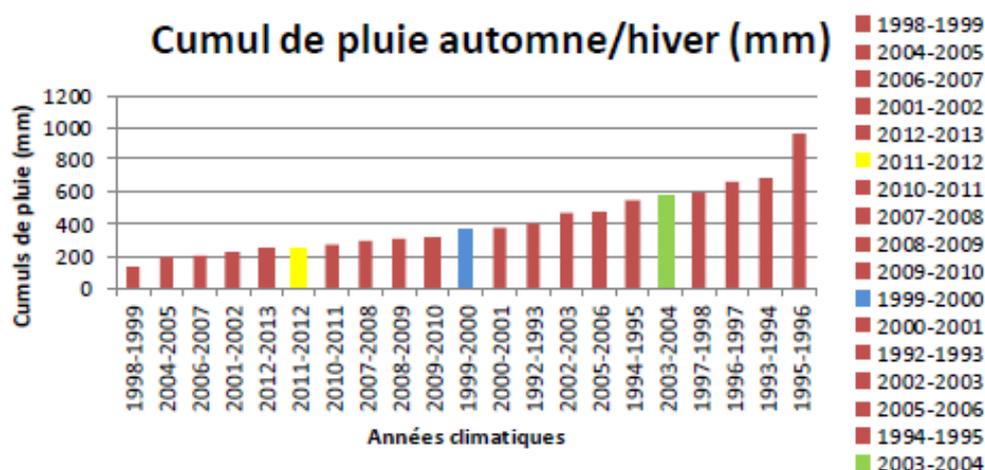


Figure 27: Cumuls de pluie annuelle (en mm) sur la période automne/hiver de 1992 à 2013. Le 1er quartile est représenté en jaune, la médiane en bleu et le 3ème quartile en vert.

Les cumuls de pluies annuels ont été calculés pour chaque saison (A/H, P/E), de 1992 à 2013, et trois quartiles ont été déterminés (Figure 27). Le premier quartile est défini comme représentant une saison sèche, la médiane et le troisième quartile correspond respectivement aux modalités « moyenne » et « humide ». La même analyse a été réalisée pour la période printemps/été, et les demi-années types ont été concaténées, pour reconstruire les années climatiques (Tableau 20).

Genèse des climats types

Afin de réaliser les simulations dans plusieurs situations contrastées et représentatives de la variabilité climatique de la zone d'étude, neuf climats ont été générés. Les fichiers météo commencent au 1/09 et se terminent au 31/08, et son divisé en deux périodes : la période automne/hiver (A/H), allant du 1/09 au 1/03 et la période printemps/été (P/E), du 1/03 au 31/08.

Chaque période est déclinée selon trois conditions initiales pour la période hivernale (quantité de précipitations pendant l'année) : saison sèche, moyenne ou humide. La saison printemps/été étant également déclinée selon ces trois conditions, on obtient les combinaisons suivantes (Tableau 20) :

- trois climats avec conditions initiales sèches + printemps/été sec ou printemps/été moyen ou printemps/été humide : climats « SS », « SM », « SH » ;
- trois climats avec conditions initiales moyennes + printemps/été sec ou printemps/été moyen ou printemps/été humide : climats « MS », « MM », « MH » ;
- trois climats avec conditions initiales humides + printemps/été sec ou printemps/été moyen ou printemps/été humide : climats « HS », « HM », « HH ».

Tableau 20: Diversité des climats simulés en termes de cumuls de précipitations, et années sélectionnées pour la représentation des saisons.

Libellé des scenarios	Automne-hiver	Printemps-été	Cumul de pluie annuel (mm)
Sec-sec ou « SS »	2011-2012	1994	385,35
Sec-moyen ou « SM »	2011-2012	2012	478,25
Sec-humide ou « SH »	2011-2012	1993	534,15
Moyen-sec ou « MS »	1999-2000	1994	497
Moyen-moyen ou « MM »	1999-2000	2012	589,9
Moyen-humide ou « MH »	1999-2000	1993	645,8
Humide-sec ou « HS »	2003-2004	1994	695,75
Humide-moyen ou « HM »	2003-2004	2012	788,65
Humide-humide ou « HH »	2003-2004	1993	844,55

2.2 Spatialisation des modalités d'entretien du sol à la résolution parcellaire pour chaque stratégie candidate

Les stratégies normatives de réduction des utilisations d'herbicides sont basées sur différentes modalités d'entretien du sol associées à l'échelle parcellaire, spatialement réparties sur le bassin versant en fonction de contraintes de mise en œuvre. A chaque stratégie correspond une carte de distribution spatiale des modalités d'entretien du sol associées. Après avoir présentées les modalités d'entretien du sol retenues pour l'évaluation de chaque stratégie, cette partie indique la façon dont les modalités retenues ont été spatialisées (Bonnefoy, 2013).

2.2.1 Les modalités d'entretien du sol modélisables pour chaque stratégie

Le modèle Dhivine ne permet pas de représenter toutes les modalités d'entretien du sol imaginables pour satisfaire, pour une stratégie donnée, l'objectif visé de réduction des herbicides. En conséquence, seules les modalités présentées dans le Tableau 21 ont été retenues pour l'évaluation par modélisation. Par ailleurs, en ce qui concerne le désherbage chimique, seule l'utilisation d'une matière active de post-levée, le glyphosate, a été prise en compte, à la dose homologuée de 2 kg/ha.

Tableau 21: Les modalités d'entretien du sol modélisables

Stratégie	Modalité d'entretien du sol	
	Code	Descriptif
1a (IFT = 0)	S1	Enherbement hivernal détruit par travail du sol dans les rangs (Rg) et inter-rangs (IR)
	S3	Enherbement hivernal détruit par travail du sol dans les rangs et un IR sur deux Enherbement permanent sur les autres IR
	S5	Enherbement permanent, spontané ou semé dans les IR Enherbement hivernal, puis travail du sol sur les rangs
	S6	Enherbement permanent intégral
1b (IFT <= 0,1)	S1	Idem 1a
	S3	Idem 1a
	S5	Idem 1a
	S6	Idem 1a
	S7	Désherbage chimique total (R+IR) avec un dés herbant de post-levée (glyphosate)
2a (IFT <= 0,3)	S1'	Enherbement hivernal détruit par travail du sol dans les IR Dés herbage chimique sur les rangs avec un passage de dés herbant de post-levée
	S3'	Enherbement hivernal détruit par travail du sol un IR sur deux Enherbement permanent sur les autres IR Dés herbage chimique (post-levée) sur les rangs
	S5'	Enherbement permanent spontané ou semé, sur tous les IR Dés herbage chimique (post-levée) sur les rangs
2b (IFT <= 0,4)	S1'	Idem 2a
	S3'	Idem 2a
	S5'	Idem 2a
	S7	Idem 1b

2.2.2 La démarche de spatialisation des modalités d'entretien du sol

Pour chaque stratégie candidate, la spatialisation des modalités d'entretien du sol vise à affecter, à chaque parcelle en vigne du bassin versant, une modalité d'entretien du sol choisie parmi celles présentées dans le tableau 21.

La démarche est basée sur une évaluation des contraintes de faisabilité liées au milieu et aux caractéristiques des parcelles de vigne. Deux contraintes ont été considérées : une contrainte agronomique, le risque de stress hydrique, et une contrainte technique, l'écartement entre les rangs de vigne. D'autres contraintes possibles (comme le taux de cailloux de la surface du sol, la praticabilité du sol ou la pente) n'ont pas été retenues car difficilement évaluables avec les données disponibles.

L'écartement des inter-rangs conditionne le passage des engins motorisés. Dans les vignes aux inter-rangs étroits (<=1,60 m), qui correspondent à des vignes anciennes, le passage d'un tracteur n'est généralement pas possible et ces vignes sont donc entretenues manuellement. En conséquence, ce sont les seules vignes dans lesquelles l'entretien du sol par dés herbage chimique intégral réalisé à la machine à dos est autorisé, et ce uniquement dans les stratégies 1b et 2b. Ces vignes ont été visuellement repérées sur Google Earth. Pour les stratégies 1a et 2a, ces vignes sont considérées comme étant arrachées.

Dans les vignes aux inter-rangs larges, la spatialisation des modalités d'entretien du sol s'est appuyée sur la cartographie des risques de stress hydrique présentée dans la Partie 2 du rapport au § 1.2. La spatialisation a été réalisée en quatre temps.

Tableau 22: Table de correspondance entre les modalités d’entretien du sol associées et les modalités évaluées par rapport aux risques de stress hydrique

Modalités d’entretien du sol associées selon les scénarios	Modalités d’entretien du sol évaluées en fonction des risques de stress hydriques	
	Code	Caractéristiques
S1, S1'	ENH60H	Enherbement hivernal sur tous les inter-rangs, puis à partir du 1 ^{er} avril, travail du sol. Travail du sol dans les rangs
S3	ENH30H	Enherbement permanent un inter-rang sur deux. Travail du sol sur les rangs et sur les inter-rangs non enherbés
S3'	ENH30	Enherbement permanent un inter-rang sur deux Travail du sol sur les inter-rangs non enherbés Désherbage chimique sur les rangs
S5	ENH60H	Enherbement permanent sur tous les inter-rangs Travail du sol sur les rangs
S5'	ENH60	Enherbement permanent sur tous les inter-rangs. Désherbage chimique sur les rangs
S6	ENH100	Enherbement permanent intégral

Premièrement, une correspondance entre modalités d’entretien du sol envisagées pour les différentes stratégies et les modalités évaluées dans le travail susmentionné a été établie (Tableau 22).

Deuxièmement, sur la base de cette correspondance, pour chacune des parcelles en vigne du bassin versant, chaque modalité d’entretien du sol a été classée comme acceptable ou non acceptable en fonction de la classe de risque de stress dans laquelle la parcelle est majoritairement située lorsque cette modalité est mise en œuvre. Comme indiqué dans le Tableau 23, les classes de risque 1, 2 et 3 qui correspondent en moyenne respectivement à 26 %, 40 % et 54 % de jours de stress entre débourrement et véraison ont été considérées comme acceptables. Les autres classes qui correspondent à un stress hydrique plus important ont été considérées comme non acceptables.

Tableau 23: Niveau d’acceptabilité des modalités d’entretien du sol selon la classe de risque

Classe de risque	% jours sous stress hydrique	Acceptabilité
1	26 %	Acceptable
2	40 %	
3	54 %	
4	66 %	Non acceptable
5	77 %	
6	86 %	

Une troisième étape, a consisté en une correction experte des résultats obtenus pour tenir compte de la présence d’une nappe d’eau à faible profondeur dans la plaine alluviale. Bien que les résultats de l’étape précédente ne fassent pas figurer l’enherbement comme modalité d’entretien du sol possible pour les parcelles situées dans la dépression alluviale juste en aval de l’exutoire, nous avons considéré que toutes les parcelles localisées dans cette zone pouvaient être partiellement enherbées sans risque majeur de stress hydrique.

Enfin, pour chaque stratégie, une modalité d’entretien du sol a été attribuée à chaque parcelle en vigne du BV, choisie parmi les modalités associées tout en étant acceptable dans la parcelle du point de vue des risques de stress hydrique. Lorsque plusieurs modalités d’entretien du sol étaient possibles, la modalité considérée la plus favorable pour la réduction des risques de ruissellement a été retenue. Ce choix a été effectué selon les règles expertes suivantes, basées sur une priorité donnée à un enherbement le plus long possible, sur la plus grande surface possible dans la parcelle :

Règle 1, pour les stratégies 1a et 1b : S6 > S5 > S3 > S1

Règle 2, pour les stratégies 2a et 2b : S5' > S3' > S1'

2.2.3 Les cartes de distribution des modalités d'entretien du sol

L'ensemble de la procédure, réalisée à l'aide d'un outil SIG, a permis d'obtenir pour chaque stratégie une carte de la distribution dans le bassin versant des modalités d'entretien du sol, à la résolution parcellaire. Un exemple de carte est présenté dans la Figure 28, pour le cas de la stratégie 1b.

Dans les vignes avec des inter-rangs larges, les modalités d'entretien du sol finalement retenues sont les modalités S1, S2, S5 pour les stratégies 1a et 1b et les modalités S'1, S'2, S'5 pour les stratégies 2a et 2b. Dans le cas des stratégies 1a et 1b, la modalité S6 (enherbement permanent intégral) n'a pas été retenue du fait d'un risque de stress hydrique trop important.

Le trait le plus marquant des différentes cartes est leur très forte similarité. Elles sont toutes caractérisées par la même répartition spatiale des modalités d'entretien des inter-rangs dans les vignes aux inter-rangs larges. Les différences entre cartes portent uniquement sur la technique d'entretien du rang mobilisée dans les vignes aux inter-rangs larges (travail du sol pour les stratégies 1a et 1b ; désherbage chimique pour les stratégies 2a et 2b) et sur la présence ou non de vignes étroites entretenues par désherbage chimique intégral. Cette similarité est probablement liée à la faible précision de l'indicateur d'acceptabilité utilisé pour établir ces cartes et au fait que les modalités S1 et S1' ont été évaluées sur la même base (Tableau 23).

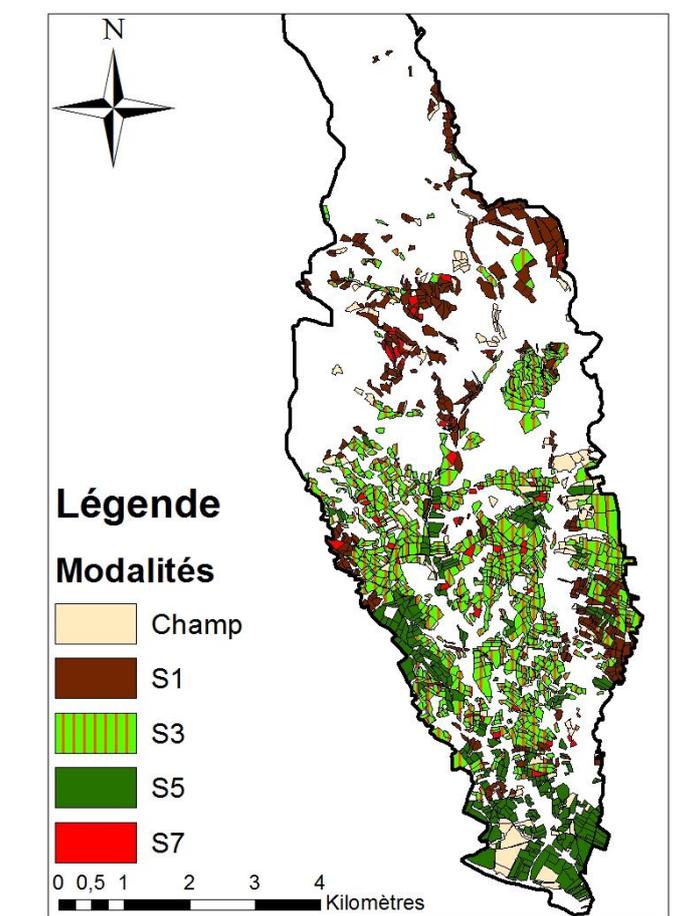


Figure 28: Répartition spatiale des modalités d'entretien du sol dans les parcelles en vigne du bassin versant du Rieutort, pour la stratégie 1b (cf. Tableau 21)

Chaque modalité d'entretien du sol est basée sur une combinaison de trois techniques d'entretien du sol (désherbage chimique, travail du sol, enherbement permanent). A partir des cartes de distribution spatiale des modalités d'entretien du sol il est possible de calculer la superficie relative de chaque technique pour chacune des stratégies. Les résultats sont présentés dans le Tableau 24. Le désherbage chimique étant réalisé en un seul apport de glyphosate à dose homologuée, l'IFT herbicide réel à l'échelle du bassin versant est égal au pourcentage de superficie en désherbage

chimique. Du fait du faible nombre de vignes étroites, l'IFT réel est inférieur à l'IFT visé dans le cas des stratégies 1b et 2b. Dans le cas, de la stratégie 2a, il est légèrement supérieur, car superficie redevable de désherbage chimique sous le rang a été considérée comme représentant 1/3 de la superficie de la parcelle.

Tableau 24: Superficie relative de chaque technique à l'échelle du bassin versant selon la stratégie

Stratégie	Superficie totale en vigne (ha)	Superficie relative		
		Désherbage chimique	Enherbement hivernal suivi d'un travail du sol	Enherbement permanent
1a	1463	0%	72 %	28 %
2a		34%	38 %	28 %
1b	1511	4%	70 %	27 %
2b		38%	35 %	27 %

2.3 Simulation des itinéraires techniques résultant de la mise en œuvre des stratégies candidates à l'échelle du bassin versant

La première phase de l'évaluation des stratégies candidates à dire de modèles est la simulation à la résolution parcellaire des itinéraires techniques résultant de l'application par chacune des exploitations du bassin versant des modalités d'entretien du sol recommandées pour ses différentes parcelles. Nous présentons dans cette partie la démarche suivie pour modéliser ces itinéraires à l'aide du modèle Dhivine décrit dans la Partie 3 § 2, puis les résultats obtenus (Bonnefoy, 2013).

2.3.1 Paramétrage du modèle Dhivine

Le paramétrage du modèle Dhivine concerne essentiellement la description des caractéristiques du vignoble, du matériel et de la main d'œuvre disponibles, et la description de la stratégie de conduite de chacune des exploitations du bassin versant. Ces exploitations sont celles qui ont au moins une parcelle en vigne sur le bassin.

2.3.1.1 La description du vignoble des exploitations

La description du vignoble de chaque exploitation a été réalisée en deux étapes : une étape de construction du parcellaire des exploitations du bassin versant, puis une étape d'affectation de caractéristiques aux parcelles de vigne.

a. La construction du parcellaire des exploitations

Le parcellaire des exploitations du bassin versant a été construit en utilisant deux sources de données : le Registre Parcellaire Graphique (RPG), le recensement agricole 2010 et le parcellaire cultural reconstruit (Partie 2, § 2.1).

Les données du RPG concernent le parcellaire des exploitations qui font une demande de subvention à la PAC. Elles sont issues des dossiers constitués annuellement par les agriculteurs et sont compilées dans un SIG. Elles donnent à l'échelle de l'îlot de parcelles, le code de l'exploitation qui le gère et l'occupation du sol. Ces données ont permis de récupérer le parcellaire de 2010 pour 74 exploitations du bassin versant du Rieutort, soit, respectivement, 60 % et 60 % de la SAU et de la superficie en vigne du bassin versant. Elles ont été désagrégées à la résolution parcellaire, en superposant dans un SIG la couche d'îlots de parcelles et celle du parcellaire cultural reconstruit.

Dans un deuxième temps, le nombre n d'exploitations du bassin versant ne faisant pas de déclaration à la PAC ainsi que le nombre total N d'exploitations du bassin versant ont été estimés selon le raisonnement décrit ci-dessous.

Considérant :

- a, le nombre d'exploitations déclarant leur siège sur l'une des quatre communes, connu d'après le recensement agricole 2010 (<http://agreste.agriculture.gouv.fr>) (a = 171) ;
- b, le nombre d'exploitations du bassin versant déclarant leur siège sur l'une des quatre communes ; l'hypothèse est faite que $b = a * r$ avec $r = (\text{superficie du bassin versant})/(\text{superficie territoire des quatre communes})$, d'où $b = 117$;
- c, le nombre d'exploitations ayant au moins une parcelle sur le bassin versant et ayant fait une déclaration à la PAC, connu d'après les données du RPG (c = 74) ;
- d, le nombre d'exploitations du bassin versant ayant fait une déclaration à la PAC, et déclarant leur siège sur l'une des quatre communes ; l'hypothèse est faite que ces exploitations ont plus de 50 % de leur superficie localisée sur le bassin versant, ce qui représente 41 des 74 exploitations précédentes ;
- e, le nombre d'exploitations du bassin versant déclarant leur siège sur l'une des quatre communes et n'ayant pas fait une déclaration à la PAC ; l'hypothèse est faite que ces exploitations, généralement de plus petite taille que les précédentes ont la totalité de leur parcellaire sur le bassin versant ;

alors $n = e = b - d = 76$ et $N = e + c = b + c - d = 150$

Dans une dernière étape, les parcellaires manquant pour les 76 exploitations ne faisant pas de déclaration à la PAC ont été générés par tirage aléatoire de parcelles culturales choisies parmi les parcelles de vigne non affectées aux exploitations recensées dans le RPG. L'affectation aléatoire de parcelles aux exploitations a été réalisée de façon à ce que soit respectée dans le bassin versant la distribution relative des classes de taille observée à l'échelle des quatre communes (Partie 2, Figure 4). Ces parcellaires, agrégés à ceux issus des données du RPG ont permis de reconstituer le parcellaire (semi-virtuel) de l'ensemble des 150 des exploitations du bassin versant (Figure 29).

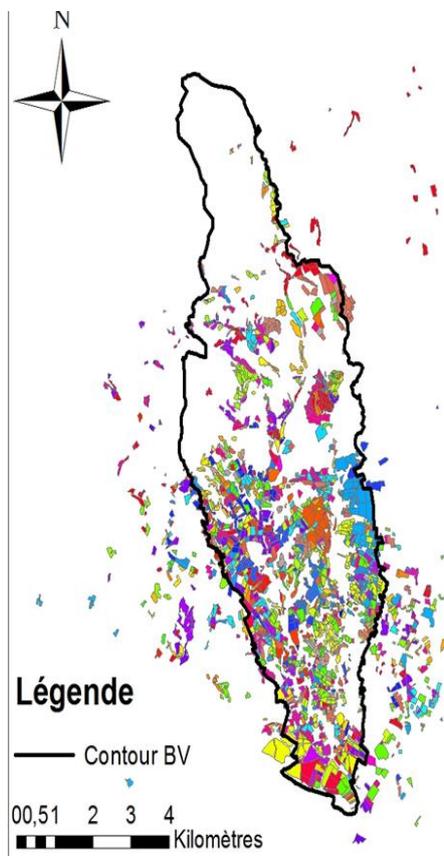


Figure 29: Mosaïque parcellaire semi-virtuelle du territoire des exploitations du bassin versant du Rieutort

b. Les caractéristiques des parcelles de vigne

Les caractéristiques, des parcelles de vigne, nécessaires à la simulation des itinéraires techniques d'entretien du sol sont les suivantes :

- la position géographique, donnée par sa latitude et sa longitude, qui permet le rattachement de la parcelle à une station climatique ;
- la superficie ;
- les caractéristiques de la plantation : largeur des inter-rangs et distance inter-ceps ;
- le type de taille

La localisation géographique et la superficie de chaque parcelle en vigne ont été calculées à l'aide d'un logiciel SIG et du parcellaire cultural construit. En l'absence de données disponibles, les valeurs des autres caractéristiques ont été déterminées par défaut :

- densité de pieds de 4000 pieds/ha, valeur très répandue régionalement ; cette densité correspond à des plantations de 2,5 m (distance entre rangs) par 1 m (distance entre ceps sur un même rang) ou, dans le cas des vignes étroites, à des plantations de 1,6 m par 1,6 m ;
- taille guyot dans les vignes larges ou gobelet dans les vignes étroites.

Pour les exploitations incluant dans leur parcellaire des vignes étroites, deux vignobles ont été créés : un vignoble pour les stratégies 1a et 2a pour lesquelles les vignes étroites sont considérées comme étant arrachées et un vignoble pour les stratégies 1b et 2b pour lesquelles les vignes étroites sont maintenues.

2.3.1.2 La description du matériel et de la main d'œuvre de chaque exploitation

En l'absence de données sur le matériel et la main d'œuvre disponibles dans les exploitations, des unités standards de matériel et de main d'œuvre ont été affectées par tranche de superficie. Pour la main d'œuvre, un travailleur multitâche, chef d'exploitation, a été affecté pour la première tranche de 20 ha, puis un travailleur multitâche par tranche supplémentaire de 15 ha. Le matériel suivant a été associé à chaque travailleur : un tracteur, un outil de travail du sol, un broyeur de sarments, un pulvérisateur tracté, un pulvérisateur à dos. Le matériel décrit ici correspond uniquement au matériel nécessaire aux chantiers que nous avons choisis de simuler.

2.3.1.3 La stratégie de conduite du vignoble

Dans le modèle Dhivine, la stratégie de conduite du vignoble dans une exploitation correspond à un plan d'action associé à des options de gestion (Partie 3 § 2.2).

a. Le plan d'action

Un plan d'action est une liste de chantiers pouvant être réalisés si le contexte le nécessite. Un chantier correspond à la réalisation d'une opération culturale sur tout ou partie du vignoble (Partie 3 § 2.2).

Bien que le modèle Dhivine permette de simuler tous les chantiers nécessaires à la conduite d'un vignoble, nous avons fait le choix de ne simuler que les chantiers d'entretien du sol et ceux nécessaires à la mise en œuvre des premiers du fait de contraintes d'enchaînement entre chantiers. Ce faisant nous ne prenons pas en compte l'impact sur le calendrier d'entretien du sol d'éventuelles concurrences entre opérations culturales pour l'accès aux ressources en matériel et main d'œuvre, en dehors de celles liées aux chantiers modélisés. Ce choix est lié à l'absence de données sur les modalités de mise en œuvre des différentes opérations culturales dans les exploitations du bassin du Rieutort et à un souci de simplification de la phase de paramétrage du modèle. Par ailleurs, parmi les opérations culturales d'entretien du sol, le modèle Dhivine ne permet pas actuellement de simuler la tonte de l'enherbement.

Un même plan d'action simplifié a donc été affecté à chacune des 150 exploitations à simuler. Ce plan d'action stipule que quatre chantiers peuvent être réalisés : deux chantiers systématiquement réalisés (la taille, le broyage des sarments), et deux chantiers dont la réalisation dépend des modalités

d'entretien du sol de l'exploitation (le désherbage chimique de fin d'hiver et le travail du sol de printemps/été). Les caractéristiques de ces chantiers sont décrites dans le tableau 25.

Tableau 25: Les caractéristiques des chantiers modélisés

Chantier	Equipement mobilisé	Vitesse	Conditions de faisabilité
Désherbage chimique motorisé	1 tracteur + 1 pulvérisateur	4 km/h	Trafficabilité: $P[j - 7; j] < 60$ mm
Désherbage chimique manuel	1 pulvérisateur à dos	400 ceps/h	-
Taille	-	75 ceps/h	-
Broyage des sarments	1 tracteur + 1 broyeur	5 km/h	Trafficabilité: $P[j - 7; j] < 60$ mm
Travail du sol dans les inter-rangs	1 tracteur + 1 cultivateur	4 km/h	Travaillabilité: $P[j - 7; j] < 40$ mm
Travail du sol dans les rangs et les inter-rangs	1 tracteur + 1 inter-cep + 1 outil inter-rang	3 km/h	Travaillabilité: $P[j - 7; j] < 40$ mm

$P[d1 ; d2]$ = cumul de pluie entre d1 and d2; j = date du jour

b. Les options de gestion

Dans Dhivine, les options de gestion concernent trois composantes de la gestion (Partie 3 § 2.2):

- les modalités d'entretien du sol, i.e., pour chaque parcelle en vigne, la combinaison des techniques d'entretien du sol et la répartition intra-parcellaire de ces techniques.
- les modalités de mise en œuvre des chantiers, i.e., les conditions de déclenchement et d'arrêt des différents chantiers, et les modes d'organisation de chacun des chantiers (en série ou en parallèle) ;
- les modalités de gestion des concurrences entre chantiers.

Les modalités d'entretien du sol

Pour les différentes stratégies de réduction d'herbicide, les modalités d'entretien du sol mises en œuvre sur les parcelles localisées sur le bassin versant sont issues des cartes de répartition spatiale des modalités d'entretien du sol (cf. § 2.2.1). Pour les parcelles localisées en dehors du bassin versant, la modalité affectée à chaque parcelle est la modalité dominante de l'exploitation à laquelle la parcelle est rattachée.

Les modalités de mise en œuvre des chantiers

Tableau 26: Valeurs des conditions d'ouverture et de fermeture des chantiers

Descripteur	Valeur
CO taille	si $j \geq 01/11$
CO broyage des sarments	Si au moins 75% du vignoble de l'exploitation a été taillé
CO désherbage chimique	Si la taille et le broyage des sarments sont terminés et $j \geq 25/02$
CO 1ier travail du sol	Si $j \geq 01/03$
	Si $j \geq 15/03$
	Si $j \geq 01/04$
CO nouveau travail du sol	si {date démarrage dernier chantier de travail du sol < $j-30$ and $P[\text{date démarrage dernier chantier de travail du sol}; j] > 40$ mm }
	si {date démarrage dernier chantier de travail du sol < $j-30$ and $P[\text{date démarrage dernier chantier de travail du sol}; j] > 40$ mm } ou date démarrage dernier chantier de travail du sol = $j-45$.
CF travail du sol	si $j \geq 15/07$

CO = condition d'ouverture; CF = condition de fermeture ; j = date du jour, $P[d1; d2]$ = cumul de pluie entre d1 et d2

Les conditions choisies pour le déclenchement et l'arrêt des différents chantiers sont synthétisées dans le tableau 26. Ce tableau indique que la taille peut démarrer le 1er novembre, le broyage des sarments dès que 75 % du vignoble a été taillé et le désherbage chimique à partir de fin février, dès que la taille et le broyage des sarments sont terminés. Trois conditions de déclenchement du premier

chantier de travail du sol ont été définies (1^{er} mars, 15 mars ou 1^{er} avril). Les conditions d'ouverture choisies pour le désherbage chimique et le premier travail du sol visent à maintenir un enherbement hivernal au moins jusque fin février/début mars. Une fois que le premier chantier du sol a été réalisé, le travail du sol peut être renouvelé selon deux conditions différentes. La première stipule qu'au moins 30 jours doivent s'être écoulés depuis le démarrage du chantier précédent et que le cumul de pluie depuis cette date doit être d'au moins 40 mm. La seconde stipule que si la condition précédente n'est pas remplie, le travail du sol peut être renouvelé dès que 45 jours se sont écoulés depuis le démarrage du chantier précédent. Cette dernière condition traduit le fait que lors de longues périodes sèches, certains viticulteurs réalisent un travail du sol pour réduire l'évaporation du sol par capillarité. Au-delà du 15 juillet, le sol n'est plus travaillé (condition de fermeture atteinte).

Lorsque plusieurs conditions d'ouverture sont possibles pour un même chantier, une seule d'entre elles, sélectionnée par tirage aléatoire, a été affectée à chaque exploitation.

L'organisation des chantiers est identique dans toutes les exploitations. Le chantier de taille est réalisé « en série », une parcelle après l'autre, plusieurs personnes pouvant travailler dans la même parcelle en même temps. Les autres chantiers sont organisés « en parallèle » (i.e., réalisés sur plusieurs parcelles simultanément) dès que le matériel et la main d'œuvre disponibles le permettent.

Les priorités entre chantiers concurrents

Les priorités entre chantiers concurrents sont les suivantes : broyage des sarments > taille et désherbage chimique > travail du sol.

2.3.2 Les simulations effectuées

Les itinéraires techniques simulés résultent de l'application par les 150 exploitations du bassin versant de la distribution des modalités d'entretien du sol à la résolution parcellaire pour chacune des quatre stratégies de réduction des utilisations d'herbicides. Ces itinéraires techniques ont été simulés à la résolution parcellaire pour les 9 climats types représentatifs de la variabilité climatique de la région. 36 simulations ont été réalisées. Chaque simulation concernait toutes les parcelles en vigne cultivées par les 150 exploitations du bassin, que ces parcelles soient ou non localisées sur le Rieutort.

2.3.3 Principaux résultats

2.3.3.1 Variabilité des calendriers de désherbage chimique et de travail du sol

a. Désherbage chimique

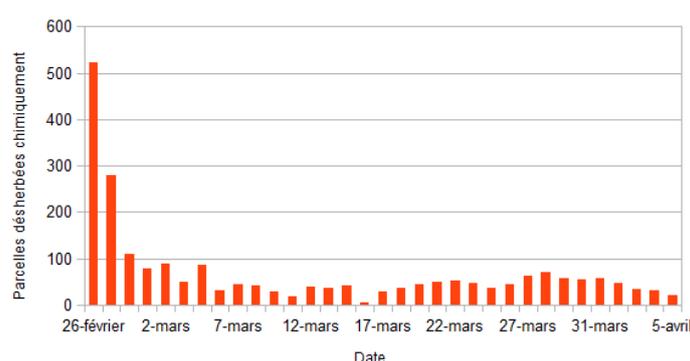


Figure 30: Exemples de calendrier de désherbage chimique (stratégie 2b, climats MH)

Les dates de désherbage chimique s'étalent entre fin février et début avril à l'échelle du bassin versant, quels que soient le climat et la stratégie simulés. Cet étalement de l'opération de désherbage chimique est lié à l'étalement des dates de fin des chantiers de taille et de broyage des sarments, lesquelles dépendent du rapport entre la surface en vigne et le nombre de travailleurs disponibles dans les exploitations. Comme le montrent le calendrier de désherbage chimique reproduit sur la figure 30 pour l'exemple du climat Moyen/Humide, fin février correspond néanmoins à un pic de désherbage. Ce pic concerne les parcelles appartenant aux exploitations qui ont terminé de tailler et

de broyer les sarments avant le 25 février. Dans nos simulations, ces exploitations sont caractérisées par une superficie en vigne par travailleur < 12,5 ha.

Les résultats montrent également que les différences de calendrier entre les climats types sont faiblement marquées ce qui s'explique (i) par la non-prise en compte dans le modèle de contraintes de faisabilité pour la taille qui pourraient retarder la fin de la taille certaines années et (ii) par la quasi absence de jours, quel que soit le climat, pour lesquels la condition de faisabilité des opérations de broyage des sarments et de désherbage chimique n'est pas réalisée.

b. Travail du sol

Variabilité liée au climat

A l'inverse du désherbage chimique, les résultats des simulations montrent que les différences climatiques impactent fortement la réalisation du travail du sol dans les exploitations. Compte tenu des conditions de déclenchement des chantiers de travail du sol, les impacts climatiques sont quasi exclusivement liés aux différences de pluviométrie de la saison printemps-été. Ils portent sur le nombre de travaux réalisés dans chaque parcelle et sur les dates de réalisation des différents travaux.

Comme indiqué sur la figure 31 pour l'exemple de la stratégie 2b, le nombre de travaux du sol varie de 2 à 3 dans quasiment toutes les parcelles travaillées dans le cas du printemps/été sec (climat moyen/sec). Ce nombre varie de 3 à 4 lorsque la pluviométrie du printemps/été est moyenne (climat moyen/moyen) ou élevée (climat moyen/humide). Cette gamme de variabilité est cohérente avec les déclarations des viticulteurs enquêtés.

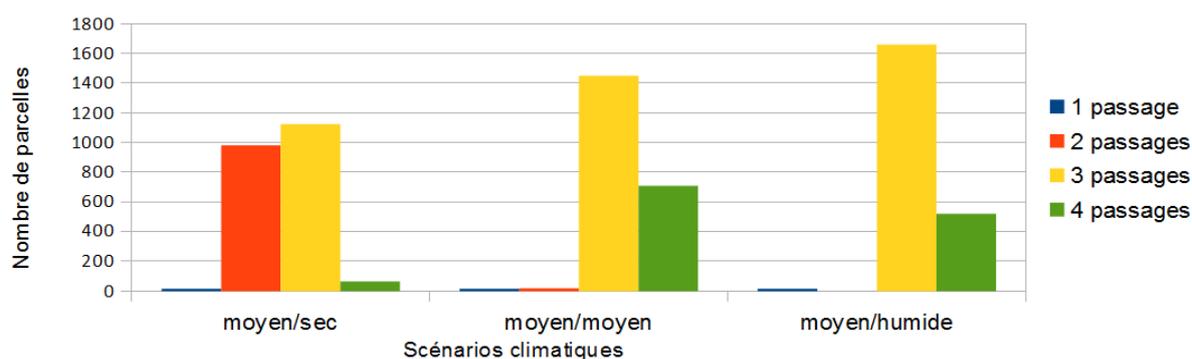


Figure 31: Histogramme du nombre de travaux du sol simulés pour la stratégie 2b selon le climat de la saison printemps/été (en nombre de parcelles concernées sur le bassin versant)

La Figure 31 montre également que le nombre de passages est plus élevé lorsque la pluviométrie du printemps/été est moyenne (climat moyen/moyen) que lorsqu'elle est élevée (climat moyen/humide). Deux éléments d'explication peuvent être donnés :

- l'augmentation avec la pluviométrie du nombre de jours durant lesquels la condition de faisabilité du travail du sol n'est pas satisfaite. Le nombre de jours non travaillables (i.e. durant lesquels la pluviométrie des 7 jours précédents est inférieure à 40 mm) est respectivement de 0, 13,6, et 17,7 pour les printemps/été sec, moyen, humide ;
- la répartition des événements pluvieux, avec une concentration des événements importants de pluie en début de saison pour le climat humide et un étalement plus homogène des pluies pour le climat moyen (Figure 32).

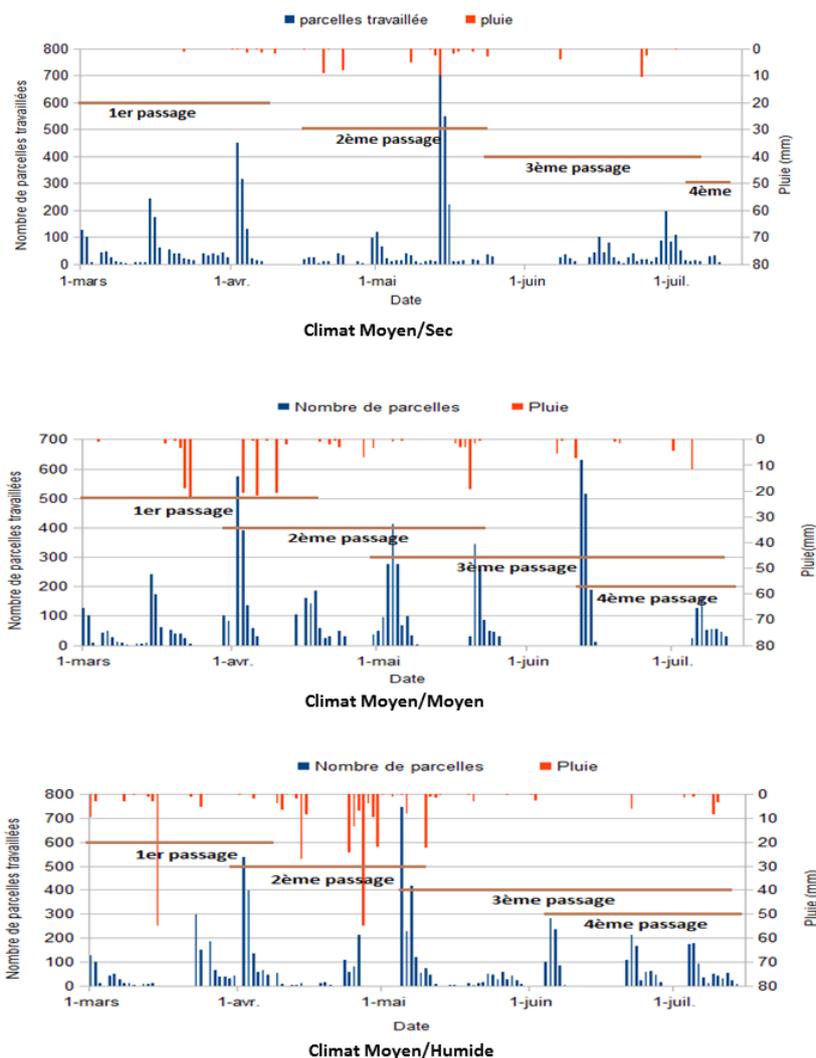


Figure 32: Calendriers de travail du sol à l'échelle du bassin versant pour les printemps/été sec, moyen et humide (stratégie 2b)

Variabilité liée au choix de paramétrage des exploitations

Les choix de paramétrage expliquent également la variabilité du nombre de travaux du sol. Ainsi, pour un même climat, la variation du nombre de travaux du sol est en partie liée à la variabilité de la date du 1^{er} travail (Figure 33, climat Moyen/Moyen). Les autres facteurs explicatifs sont la vitesse d'avancement des chantiers de travail dans les exploitations, fonction de la superficie à faire par nombre de travailleurs et la variabilité des règles de renouvellement des travaux entre exploitations.

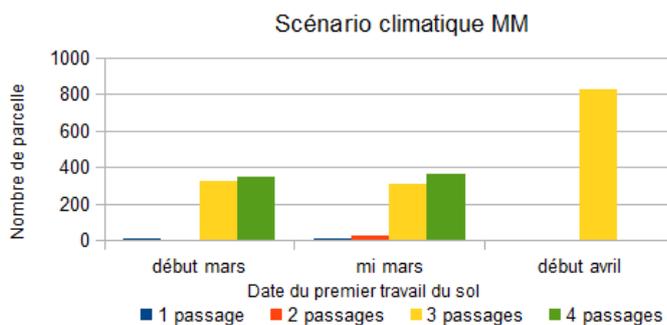
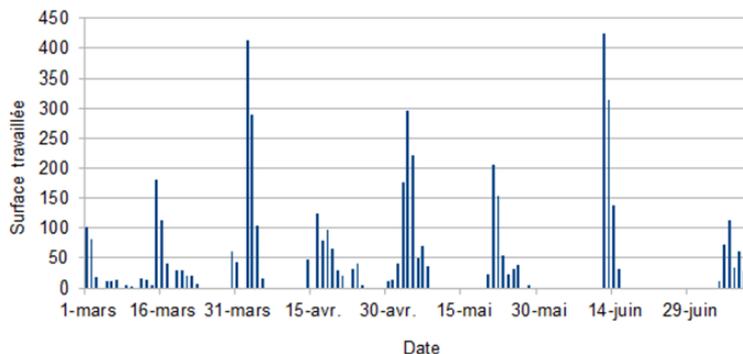


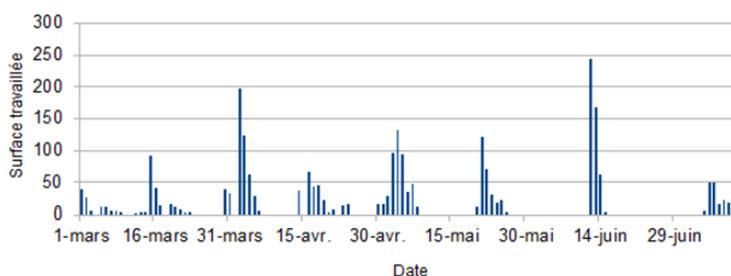
Figure 33: Impact de la date du premier travail du sol sur le nombre de passages (stratégie 2b, climat Moyen/Moyen)

Variabilité liée aux stratégies

A l'inverse du climat, les différences entre stratégies impactent faiblement le calendrier de travail du sol à l'échelle du bassin versant (Figure 34 pour le cas du climat Moyen/Moyen), malgré la superficie entretenus par travail du sol plus importante pour les stratégies 1a et 1b que pour les stratégies 2a et 2b. Ces résultats sont peut-être dus à une sous-estimation dans le paramétrage du modèle de la vitesse de travail du sol lorsque les rangs sont travaillés. Ils peuvent également être liés au pas de temps du modèle Dhivine (1h) qui amortit les différences d'avancement des travaux entre parcelles.



Stratégie 1b



Stratégie 2b

Figure 34: Calendrier de travaux de sol pour les stratégies 1a et 2b (climat Moyen/Moyen)

2.3.3.2 Dynamiques spatio-temporelles des opérations d'entretien du sol à l'échelle du bassin versant

Les itinéraires techniques simulés, précisément localisés sur chacune des parcelles du bassin versant permettent de représenter la dynamique spatio-temporelle des opérations de désherbage chimique et de travail du sol à l'échelle du bassin versant. Cette dynamique est illustrée sur la figure 35 pour le cas du travail du sol dans le cas de la stratégie 2 et du climat Moyen/Sec.

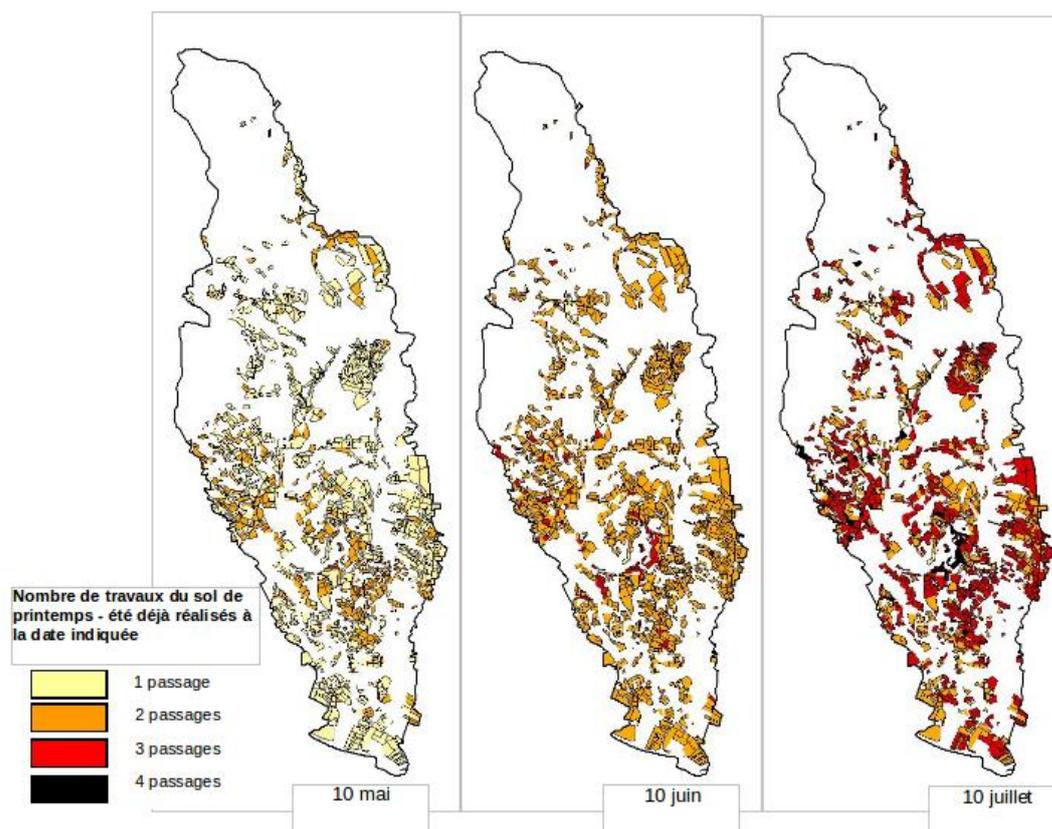


Figure 35: Dynamique spatio-temporelle des opérations de travail du sol à l'échelle du bassin versant (stratégie 2b, climat Moyen/Sec)

2.3.4 Intérêts et limites de l'approche

L'utilisation du modèle Dhivine nous a permis de simuler la variabilité des itinéraires techniques d'entretien du sol et leur répartition spatiale sur le bassin versant du Rieutort pour différents climats et différentes stratégies de réduction des herbicides à l'échelle du bassin versant. Les simulations ont été réalisées en tenant compte (1) de règles de déclenchement des chantiers d'entretien du sol variées selon les exploitations et (2) de disponibilités en matériel et main d'œuvre également variées (variabilité des ratios de superficie en vigne par unité de matériel et par unité de main d'œuvre). Ces choix nous ont permis de générer une variabilité du nombre de travaux du sol selon les parcelles ainsi qu'un certain étalement des calendriers cultureux de travail du sol et de désherbage chimique sur le bassin versant que nous estimons représentatifs de la réalité des pratiques des agriculteurs.

Néanmoins quelques limites liées à nos choix de paramétrisation sont à souligner :

- en choisissant un plan d'action simplifié basé sur la mise en œuvre de quatre chantiers maximum, nous avons artificiellement éliminé de nombreuses situations de concurrences entre opérations culturales au sein des exploitations, et de ce fait probablement surestimé le nombre de travaux du sol dans certaines exploitations ;
- le paramétrage du matériel et la main d'œuvre basé sur l'affectation d'unités standards de matériel et de main d'œuvre par tranche de superficie en vigne, ne reflète pas la réalité de toutes les exploitations, certaines pouvant être mieux dotées et d'autres moins bien, avec des conséquences sur les calendriers cultureux et les itinéraires techniques pouvant réellement être mis en œuvre ;
- enfin, pour paramétrer la mise en œuvre d'un travail du sol sous le rang nous avons considéré que ce dernier était systématiquement réalisé en même temps que travail du sol dans les inter-rangs, ce qui ne représente pas toujours la réalité.

Enfin, une autre limite à souligner est liée au fait que le modèle Dhivine, dans sa version actuelle, ne simule pas les opérations de tonte de l'enherbement.

2.4 Distribution des rendements en fonction des modalités d'entretien des sols (en fonction des 5 types de sol à l'échelle du bassin versant)

Pour estimer les pertes de rendement à l'échelle du bassin versant, nous avons considéré les pertes de rendement sur les 5 sols types en prenant en compte la variabilité des itinéraires techniques simulés par le modèle DHIVINE dans chacune des parcelles (un itinéraire technique par climat) pour les modalités d'entretien du sol issues de la spatialisation des modalités d'entretien du sol associées pour chacune des stratégies candidates (voir Partie 1).

Après la présentation des caractéristiques des parcelles d'étude, les résultats sont structurés en 3 points : distribution des stress hydriques, distribution des stress azotés, estimation des pertes de rendements associées aux différents modes de gestion des sols.

2.4.1 Caractérisation des parcelles d'étude dans le bassin versant

2.4.1.1 Sélection des parcelles

Les zones ont été choisies en fonction de leur représentativité par rapport à la typologie des sols, ainsi que leur facilité d'accès. La couche vectorielle (Bonney, 2013) représentant les 5 types de sols sur le bassin versant, a été importée dans un logiciel de cartographie (Quantum GIS) : pour chaque type de sol (5 au total), un secteur vaste a été privilégié sur la carte, afin d'assurer une certaine homogénéité des sols dans son périmètre (Figure 36). Les zones sont situées à l'intérieur de chacun de ces 5 secteurs, de sorte à occuper une position assez "centrale". En effet, on évite de se placer en limite avec une autre zone de la typologie, car les risques hétérogénéité des sols y sont plus élevés.

Grâce aux informations fournies par les enquêtes réalisées (Chavassieux, 2013) auprès des viticulteurs du bassin versant, les différentes exploitations ainsi que leurs terres sous ont été localisées sur la carte de la zone. Ainsi, en croisant la localisation des parcelles avec celle des zones établies précédemment, 5 parcelles ont été choisies et localisées pour effectuer les mesures et prélèvements nécessaires à l'acquisition des paramètres d'entrée du modèle WaLIS. Les enquêtes ont également permis d'obtenir des informations complémentaires quant aux opérations techniques réalisées sur ces terres (fertilisation...), les cépages cultivés par les vignerons, et les rendements moyens réalisés en 2011.

Le paramétrage des modèles de bilan hydrique et azoté a été réalisé à partir de données issues d'enquêtes, inventaire floristique et de cartes pédologiques de la zone.

Les cinq parcelles ont été sélectionnées en fonction du type de sol qu'elles représentaient dans un objectif de représentativité des différentes situations sur le bassin, et cela avant d'avoir pris connaissance des ITK simulés par le modèle DHIVINE.

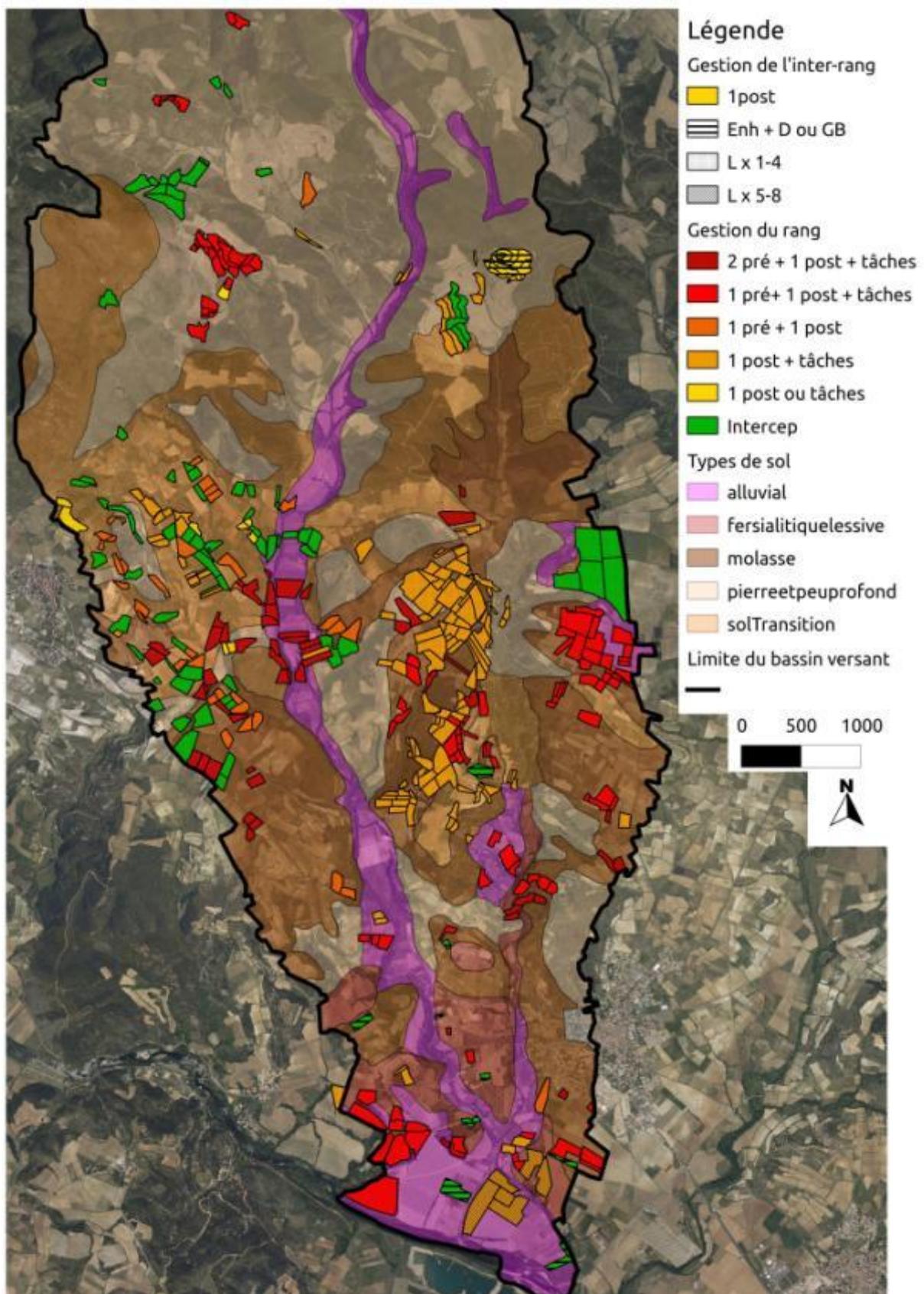


Figure 36: Carte du bassin versant : types de sols et pratiques de gestion du sol dans certaines parcelles de vigne (enquête de Diane Chavassieux, UMR Innovation, juin 2013). L : labour, D : disques ; GB : girobroyeur ; Enh : enherbement ; pré/post : désherbage chimique en pré/post-levée ; tâches : désherbage chimique en tâches. Auteur : Léo GARCIA, 2013

En conséquence, les simulations des bilans hydrique et azoté et de leurs conséquences sur le rendement n'ont pas été réalisées sur l'ensemble de la diversité des situations (ITK x type de sol x climats) possibles dans le bassin versant mais sur une sélection jugée représentative et extrapolable. Les parcelles sont présentées dans le tableau 27 ci-dessous.

Tableau 27: Présentation des parcelles de la simulation (code parcelle, type de sol et modalité d'entretien du sol affecté à la parcelle selon les stratégies).

Parcelle	Type de sol	Modalité d'entretien du sol pour la stratégie 1a	Code pour la modalité d'entretien du sol	Modalités d'entretien du sol pour la stratégie 2a	
RT033_20	molasse	Enherbement permanent, sur toute la surface jusqu'au printemps et désherbage mécanique du rang à partir du 1/03	S5	Idem que 1a mais désherbage chimique du rang au printemps	S5'
RT075_38	fersiallitique	Enherbement permanent, sur toute la surface jusqu'au printemps et désherbage mécanique du rang à partir du 1/03	S5	Idem que 1a mais désherbage chimique du rang au printemps	S5'
RT067_22	transition	Enherbement hivernal sur toute la surface, travail du rang et d'un IR sur deux à partir du printemps (1 IR sur 2 enherbé)	S3	Idem que 1a mais désherbage chimique du rang au printemps	S3'
RT052_35	« pierre » et peu profond	Enherbement hivernal sur toute la surface, rang et inter-rangs désherbés mécaniquement à partir du printemps (herbe détruite)	S1	Idem que 1a mais désherbage chimique du rang au printemps	S1'
RT054_1	alluvial	Enherbement permanent, sur toute la surface jusqu'au printemps et désherbage mécanique du rang à partir du 1/03	S5	Idem que 1a mais désherbage chimique du rang au printemps	S5'

Pour chaque année climatique, pour chaque modalité d'entretien du sol affectée aux parcelles, les dates de réalisation du désherbage chimique et des différents travaux du sol sont issus des simulations réalisées par le modèle Dhivine pour chacune de ces parcelles. Le modèle DHIVINE ne simulant pas de tontes, mais seulement du désherbage mécanique ou chimique, les paramètres liés à la tonte de l'herbe n'ont pas été pris en compte. Pour chaque année climatique, le LAI initial a été fixé à 0, afin que le modèle WaLIS simule la levée d'un couvert non établi en début de simulation. La date de levée a été fixée au 1er septembre, date du début de la simulation.

Cas particulier de la parcelle située dans la zone alluviale : Pour tenir compte de la présence d'une nappe d'eau à faible profondeur dans la plaine alluviale, la présence d'un enherbement permanent sur tous les inter-rangs a été jugé acceptable dans les parcelles de cette zone, alors que l'évaluation de l'acceptabilité des différentes modalités d'entretien du sol à partir des cartes de stress hydrique avait abouti à la sélection du travail du sol comme modalités d'entretien des IR.

Toutefois, ce changement à dire d'expert n'a pu être pris explicitement en compte dans la simulation du bilan hydrique par WaLIS, car **le modèle ne considère pas les remontées capillaires issues de la nappe.**

2.4.1.2 Caractérisation hydrique des parcelles : calcul des TTSW

Les profondeurs mesurées sur le terrain ont également été comparées avec les profondeurs indiquées dans la carte pédologique des sols afin de vérifier la cohérence entre les deux données. Pour des profondeurs supérieures à 1,1 m (taille de la tarière utilisée), la valeur donnée par le document a été utilisée pour le calcul de Total Transpirable Soil Water (TTSW).

2.4.2 Résultats

2.4.2.1 Distribution des stress hydriques

a. Faibles écarts entre stratégies

Les courbes de FTSW de la vigne dans la période débourrement – 31/08 (respectivement figures 37 et 38) montrent peu de différences entre les deux stratégies. En effet, les deux courbes se chevauchent en permanence sauf au début de la période. Cette différence observée entre les deux stratégies est due au léger changement de modalités d'entretien du sol entre les deux stratégies : dans le 2a, un désherbage chimique est effectué sur le rang uniquement et avant tout travail du sol. Cela engendre un changement d'état de surface du sol, une diminution de la capacité d'infiltration du sol (l'herbe est détruite) et donc de l'infiltration elle-même. La période durant laquelle l'état de surface des sols diffère d'une stratégie à l'autre étant courte par rapport à la période totale (de quelques jours à 1 mois), l'impact du désherbage chimique est très faible sur le bilan hydrique visible sur les valeurs de FTSW (Figure 37).

Tableau 28: Indicateurs de précision calculés en comparant les deux stratégies. La stratégie « observée » est la stratégie 1a, la « prédite » est la stratégie 2a. N : nombre d'observations ; Moyenne obs/pred : moyenne des valeurs « observées » (1a)/prédites (2a) ; E-type obs/pred : écart-type de la distribution des valeurs en 1a/2a ; MSE : mean squared error ; RMSE : root mean squared error ; RRMSE : relative root mean squared error.

Comparaison des stratégies 1a et 2a – FTSW de la vigne		
N	Moyenne obs	Moyenne pred
16470	0.546	0.546
Biais	E-type obs	E-type pred
-1.162e-05	0.355	0.354
MSE	RMSE	RRMSE
6.947e-05	0.008	0.015

La comparaison de ces deux stratégies (Tableau 28) nous donne une RRMSE très faible dans les deux cas (respectivement 1,5 et 1,3 %), ce qui montre à nouveau une très faible variabilité entre les deux stratégies. Nous ne conserverons donc que la stratégie 1a pour la suite de l'analyse des résultats, et nous comparerons les données entre les différentes parcelles et les 9 climats tests envisagés.

b. Comportement hydrique des parcelles

Variabilité des réserves hydriques

La Figure 37 ci-dessous montre également que la variabilité de la FTSW dépend ici essentiellement des sols (et donc des réserves hydriques possibles). Chaque ligne correspond à l'évolution de la variable (FTSW) pour tous les climats, et on remarque que la forme des courbes varie plus d'une parcelle à l'autre qu'en fonction des climats.

La parcelle RT052_35 (sols peu profonds, inter-rangs travaillés à partir du printemps) possède systématiquement les réserves en eau les plus faibles, avec des valeurs moyennes de FTSW de 0.3 respectivement, en condition la plus humide (climat « HH »). En conditions sèches la valeur maximale de FTSW de cette parcelle est de 0,5 (c'est-à-dire la moitié de sa réserve utile), indiquant un risque de

stress pour la période allant du débourrement à la floraison (Pellegrino et al., 2006). A contrario, la parcelle RT054_1 (sols profonds, inter-rangs travaillés) est toujours caractérisée par la plus grande réserve hydrique, et sa FTSW n'atteint la valeur de 0.5 qu'à la mi-juin en condition sèches.

Les parcelles RT067_22 (enherbée 1 IR sur 2) et RT033_20 (enherbée) possède le même comportement hydrique avec des valeurs de FTSW semblables : ces deux parcelles ont des valeurs de TTSW quasi-identiques pour la vigne, ce qui peut expliquer leur similarité au niveau du bilan hydrique. La parcelle RT075_38 quant à elle se situe à un niveau intermédiaire entre ces deux dernières et la RT054_1, il en va de même pour sa TTSW.

FTSW vigne depuis débournement

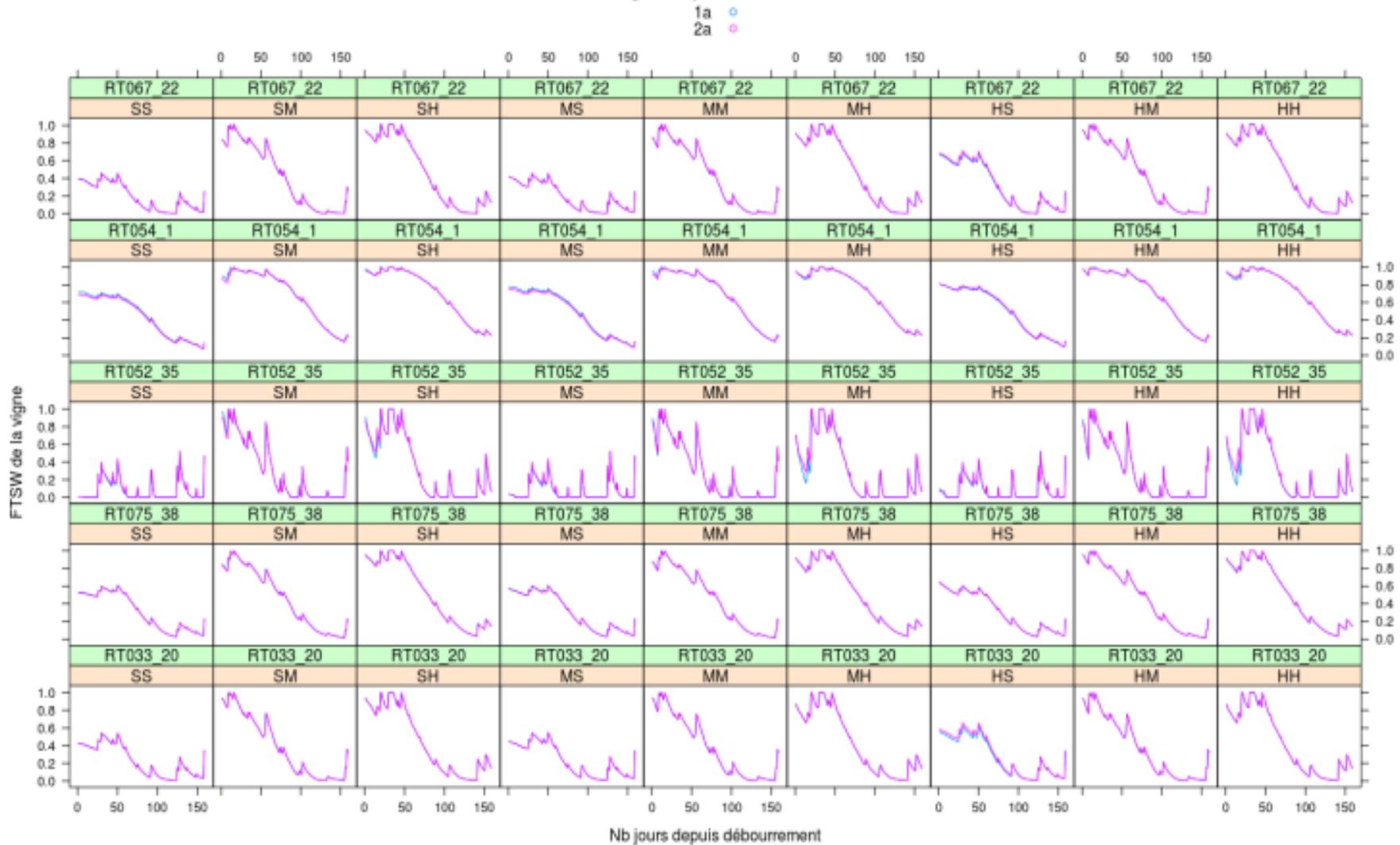


Figure 37: FTSW de la vigne, simulée depuis débournement (26/03) jusqu'au 31/08 pour les stratégies 1a et 2a. En bleu : stratégie 1a, en violet : stratégie 2a.

Evolution du bilan hydrique selon les climats

Si l'on représente l'évolution de la FTSW pour chaque parcelle, en fonction des climats (figures 37 et 38), on remarque que l'allure des courbes est la même d'une parcelle à l'autre. La FTSW est stable du débourrement jusqu'à la floraison (~ 65 jours après débourrement), puis chute jusqu'à un minimum atteint pendant le mois de juillet. En climat moyen (ie « MM »), la chute commence plus tôt car les pluies sont moindres par rapport au climat « HH » dans la période débourrement-floraison. En climat sec, il est possible que la vigne régule sa transpiration et retarde ainsi la chute de FTSW.

La figure 37 montre un échelonnage entre les trois courbes de FTSW dans les climats « SS », « MM » et « HH » : les plus faibles valeurs sont observées pour le climat le plus sec, comme attendu, la FTSW est supérieure en climat humide et intermédiaire en climat moyen. Notons qu'à la floraison cette tendance est bien présente, et moins marquée en fin de simulation car toutes les parcelles sont alors en déficit hydrique. L'échelonnage entre les trois climats est moins évident pour les parcelles les plus extrêmes (RT052_35 et RT054_1). La première possède une faible TTSW, qui réagit très vite aux événements climatiques (pluies ou sécheresse) : si une forte pluie intervient en climat « SS » et non dans les deux autres, les réserves en eau et la FTSW de la vigne peuvent être supérieures pour ce climat (il y a alors apparition de pics sur les courbes). En revanche, la chute de FTSW est plus brutale pour cette parcelle. La parcelle RT054_1 possède de grandes réserves d'eau, qui semblent tamponner l'effet « météo » : les différences entre le climat moyen et le climat humide sont moins marquées, et il n'y a pas de pics sur les graphes indiquant un changement brutal de la FTSW.

La figure 38 montre ce même échelonnage pour les autres climats, formant des groupes de 2 suivant leur climat printanier : « MS » et « HS », « SM » et « HM », et enfin « SH » et « MH ». Cela montre que l'évolution de la FTSW depuis débourrement dépend surtout de la météo sur la période printemps-été, et les effets du climat automne-hiver et de la recharge hivernale des sols semblent être faibles par rapport à la FTSW après débourrement.

Evolution de la FTSW et de l'ASW selon les parcelles

Les courbes des figures 37, 38 et 40 montrent un plateau stable jusqu'à 60 jours, puis une chute de la FTSW jusqu'au minimum atteint pendant l'été. On remarque encore que l'évolution de la FTSW est fortement conditionnée par le climat printanier. Les différences entre les parcelles semblent dépendre plus fortement de leur FTSW que de leurs modalités respectives d'entretien du sol. En effet, les deux parcelles travaillées, où l'enherbement est détruit début avril, se trouvent aux deux positions extrêmes : la parcelle RT054_1 est la moins stressée, la parcelle RT052_35 subit les plus fortes contraintes hydriques. Entre les deux se trouvent les trois autres parcelles, « classées » selon la taille de leur TTSW. Ce dernier paramètre semble donc être déterminant dans la simulation du bilan hydrique dans WaLIS, et masque ici l'effet des itinéraires techniques.

A noter qu'en climat « SS », l'ordre est différent pour les parcelles RT033_20 et RT067_22 : la première, enherbée sur tous les inter-rangs, montre un stress hydrique inférieur (sa FTSW de la vigne moyenne depuis débourrement est de 0,23) à la parcelle enherbée un inter-rang sur deux (FTSW moyenne de 0,19). La parcelle RT067_22 possède la plus grande TTSW et ses réserves hydriques (ASW) sont faibles (figure 39) : sa FTSW se retrouve inférieure à celle de la parcelle RT033_20. Une raison qui pourrait expliquer pourquoi les réserves en eau de la parcelle enherbée un IR sur deux sont inférieures à celles de la parcelle enherbée sur tous les IR, serait la régulation de la transpiration de l'herbe additionnée à l'évaporation du sol. L'herbe régule sa transpiration à partir d'une FTSW de 0,5, l'évaporation du sol nu n'est en revanche pas régulée : la parcelle enherbée sur tous les IR voit la transpiration du couvert limitée car le seuil est atteint dès le débourrement (26/03). La régulation est moindre pour la parcelle RT067_22, qui n'a qu'un tiers de sa surface enherbée : le sol nu (2/3 de la surface de la parcelle) subit l'évaporation, réduisant ainsi les réserves hydriques du sol de manière plus importante que pour l'autre parcelle. La transpiration du couvert végétal semble donc être inférieure à l'évaporation du sol nu en climat sec. Dans les deux autres climats, l'eau n'est plus un facteur limitant et on retrouve le classement des parcelles par valeurs de TTSW (RT054_1 > RT075_38 > RT067_22 > RT033_20 > RT052_35).

Enfin, on remarque la forte variabilité de la FTSW de la parcelle très superficielle (Figure 39). La courbe présente de nombreux pics suivis de chutes brutales de la FTSW (de l'ordre de 0,4 à 0,7 en fonction des climats) : la TTSW étant très faible pour cette parcelle (33 mm), la moindre variation d'ASW provoque une forte variation de FTSW. En climat moyen et humide, cette parcelle est en condition de stress hydrique dès la floraison puisqu'elle passe sous le seuil de FTSW de 0,6 (Pellegrino et al., 2006). En conditions sèches, sa FTSW ne dépasse jamais 0,5.

Evolution de la FTSW et de l'ASW selon les parcelles

Les courbes des figures 37, 38 et 40 montrent un plateau stable jusqu'à 60 jours, puis une chute de la FTSW jusqu'au minimum atteint pendant l'été. On remarque encore que l'évolution de la FTSW est fortement conditionnée par le climat printanier. Les différences entre les parcelles semblent dépendre plus fortement de leur FTSW que de leurs modalités respectives d'entretien du sol. En effet, les deux parcelles travaillées, où l'enherbement est détruit début avril, se trouvent aux deux positions extrêmes : la parcelle RT054_1 est la moins stressée, la parcelle RT052_35 subit les plus fortes contraintes hydriques. Entre les deux se trouvent les trois autres parcelles, « classées » selon la taille de leur TTSW. Ce dernier paramètre semble donc être déterminant dans la simulation du bilan hydrique dans WaLIS, et masque ici l'effet des itinéraires techniques.

A noter qu'en climat « SS », l'ordre est différent pour les parcelles RT033_20 et RT067_22 : la première, enherbée sur tous les inter-rangs, montre un stress hydrique inférieur (sa FTSW de la vigne moyenne depuis débourrement est de 0,23) à la parcelle enherbée un inter-rang sur deux (FTSW moyenne de 0,19). La parcelle RT067_22 possède la plus grande TTSW et ses réserves hydriques (ASW) sont faibles (figure 40) : sa FTSW se retrouve inférieure à celle de la parcelle RT033_20. Une raison qui pourrait expliquer pourquoi les réserves en eau de la parcelle enherbée un IR sur deux sont inférieures à celles de la parcelle enherbée sur tous les IR, serait la régulation de la transpiration de l'herbe additionnée à l'évaporation du sol. L'herbe régule sa transpiration à partir d'une FTSW de 0,5, l'évaporation du sol nu n'est en revanche pas régulée : la parcelle enherbée sur tous les IR voit la transpiration du couvert limitée car le seuil est atteint dès le débourrement (26/03). La régulation est moindre pour la parcelle RT067_22, qui n'a qu'un tiers de sa surface enherbée : le sol nu (2/3 de la surface de la parcelle) subit l'évaporation, réduisant ainsi les réserves hydriques du sol de manière plus importante que pour l'autre parcelle. La transpiration du couvert végétal semble donc être inférieure à l'évaporation du sol nu en climat sec. Dans les deux autres climats, l'eau n'est plus un facteur limitant et on retrouve le classement des parcelles par valeurs de TTSW (RT054_1 > RT075_38 > RT067_22 > RT033_20 > RT052_35).

Enfin, on remarque la forte variabilité de la FTSW de la parcelle très superficielle (Figure 39). La courbe présente de nombreux pics suivis de chutes brutales de la FTSW (de l'ordre de 0,4 à 0,7 en fonction des climats) : la TTSW étant très faible pour cette parcelle (33 mm), la moindre variation d'ASW provoque une forte variation de FTSW. En climat moyen et humide, cette parcelle est en condition de stress hydrique dès la floraison puisqu'elle passe sous le seuil de FTSW de 0,6 (Pellegrino et al., 2006). En conditions sèches, sa FTSW ne dépasse jamais 0,5.

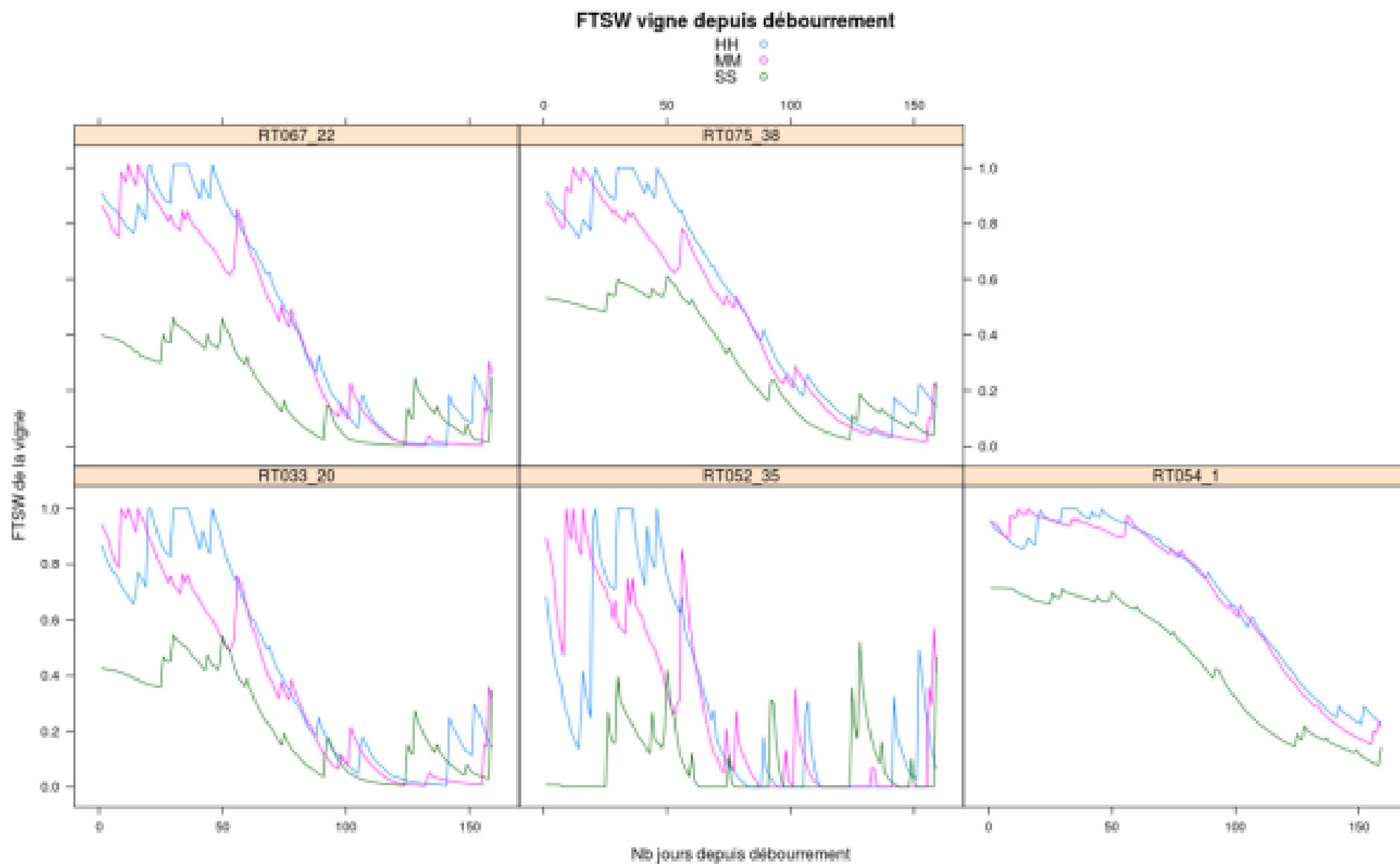


Figure 38: FTSW de la vigne, simulée du débournement au 31/08. En vert: climat SS ; en rose : climat MM ; en bleu : climat HH.

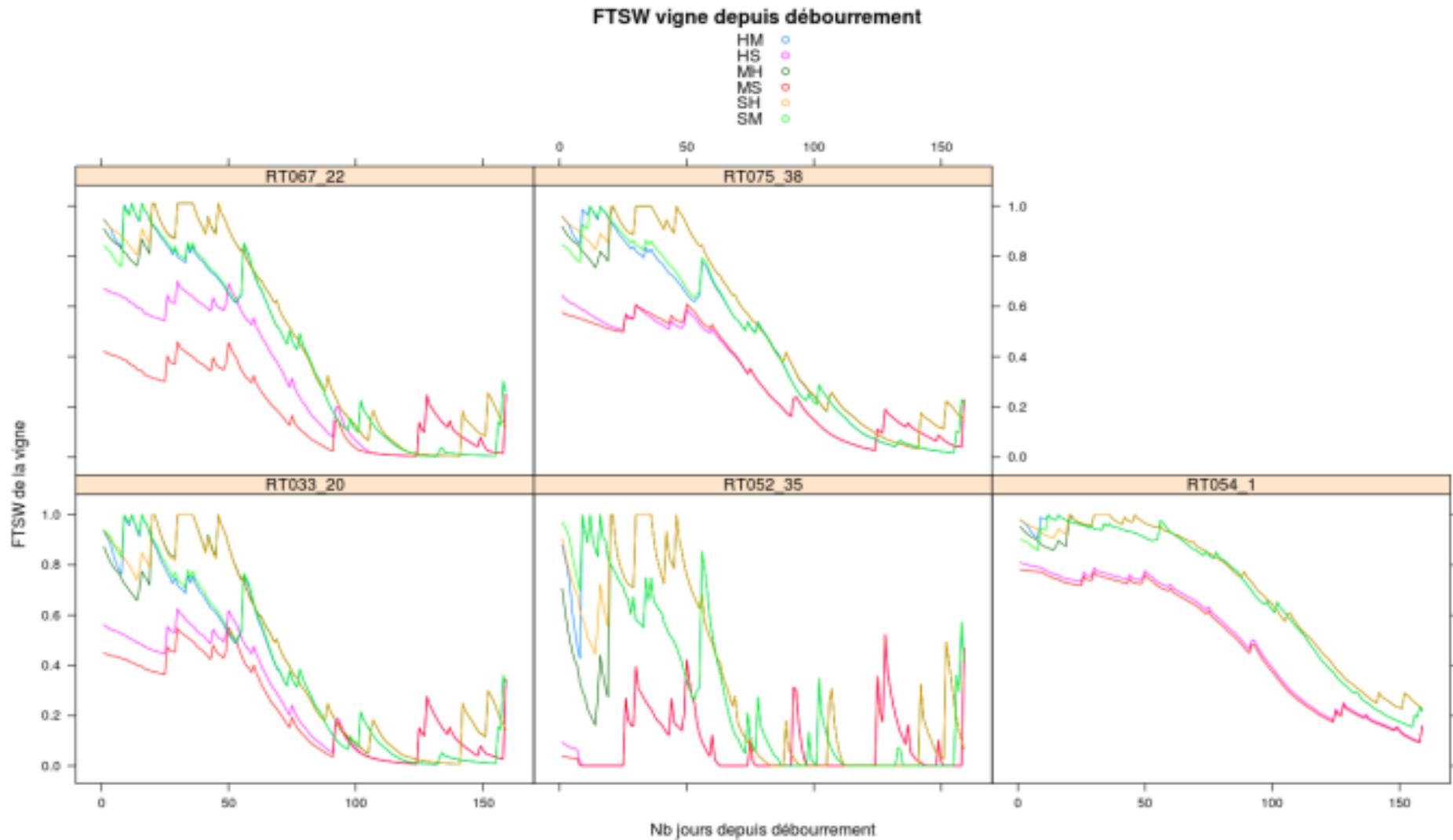


Figure 39: FTSW de la vigne, simulée du débournement au 31/08. En vert clair: climat SM ; en rose : climat HS ; en bleu : climat HM ; en jaune : climat SH ; en rouge : climat MS et en vert foncé : climat MH.

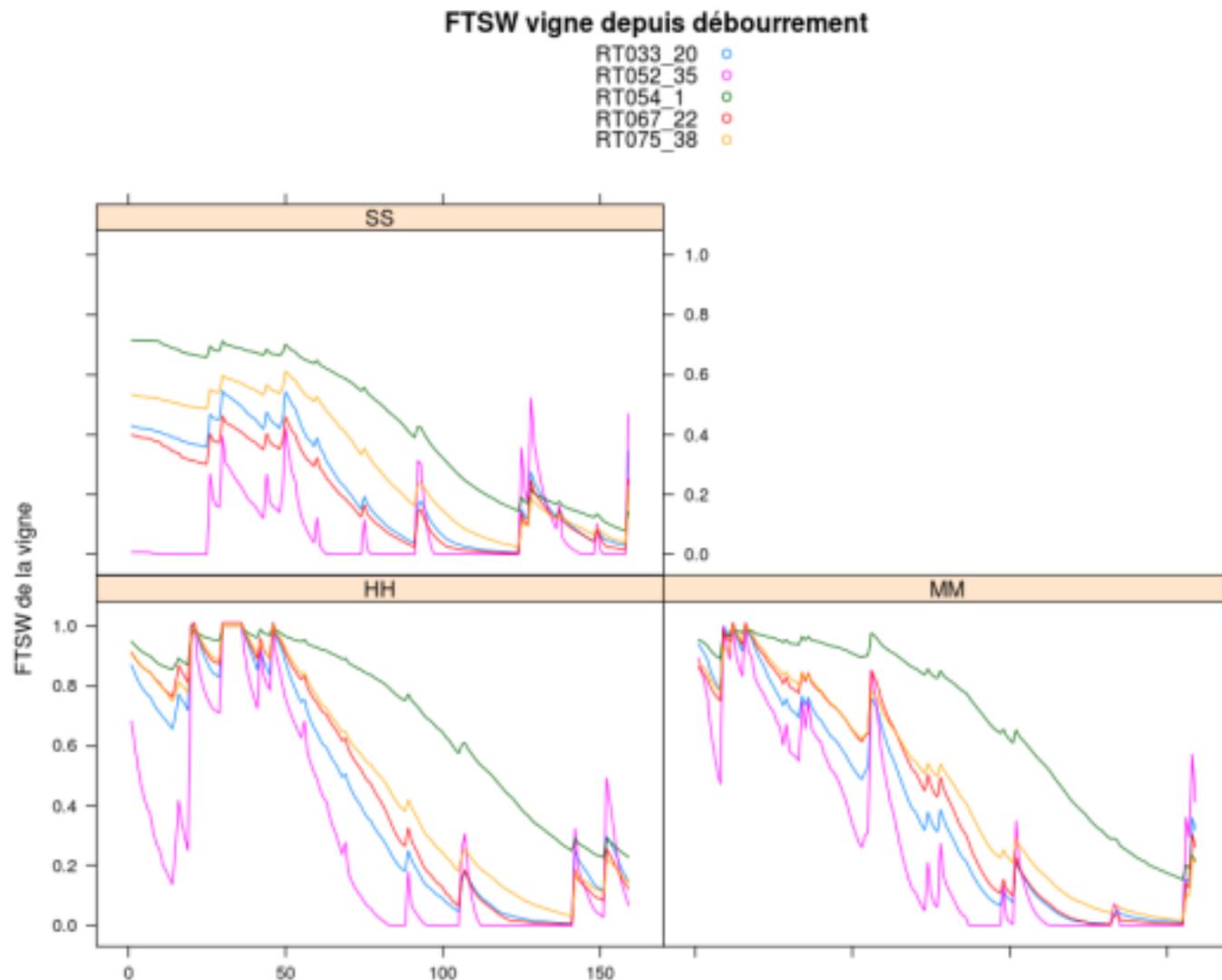


Figure 40: FTSW de la vigne, du débourrement jusqu'au 31/08. Représentation des parcelles, en vert : RT054_1, en jaune : RT075_38, en rose : RT052_35, en bleu : RT033_20, en rouge : RT067_22.

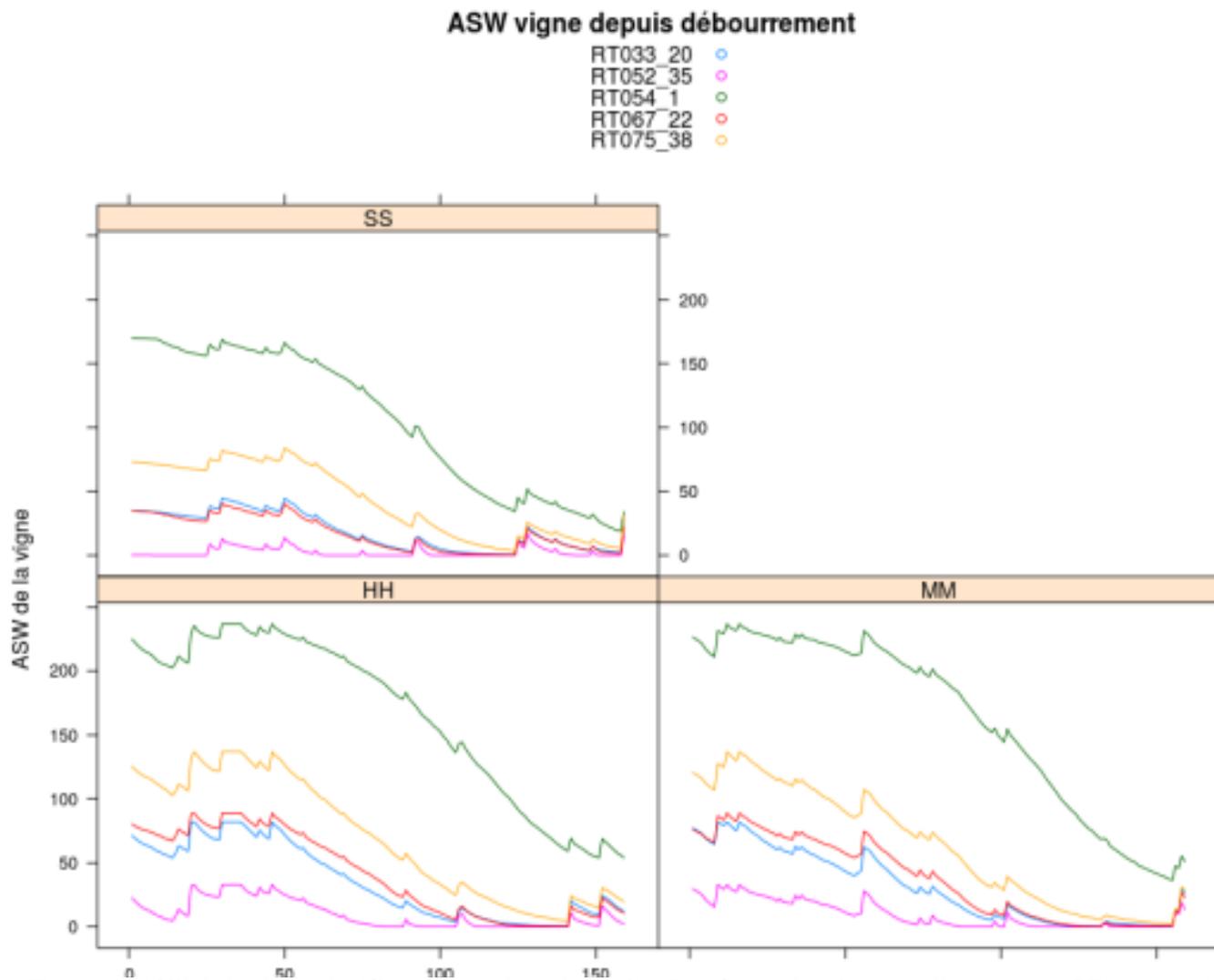


Figure 41: ASW de la vigne, du débourrement jusqu'au 31/08. Représentation des parcelles, en vert : RT054_1, en jaune : RT075_38, en rose : RT052_35, en bleu : RT033_20, en rouge : RT067_22

Croissance de l'herbe et évapotranspiration du couvert

Le tableau 29 représente les cumuls de transpiration du couvert végétal depuis le débourrement jusqu'au 31/08, pour tous les couples parcelle/climat de la stratégie 1a, classé de la plus forte à la plus faible valeur.

Tableau 29: Cumul des ETRh de l'ensemble des simulations de la stratégie 1a par ordre de décroissant de valeurs. En vert : parcelles enherbées sur tous les IR; en vert clair : parcelles enherbées un IR sur deux; en marron : parcelles travaillées.

Climat	Parcelle	ETRh	Climat	Parcelle	ETRh
HH	RT075_38	99,5	SS	RT075_38	25,6
MH	RT075_38	99,3	HH	RT054_1	19,3
SH	RT075_38	93,8	HM	RT054_1	19,3
HM	RT075_38	85,4	MH	RT054_1	19
MM	RT075_38	83	MM	RT054_1	16,9
SH	RT033_20	81,5	HS	RT067_22	16
MH	RT033_20	80,1	MS	RT067_22	14,7
HH	RT033_20	79,5	HM	RT052_35	14,3
SM	RT075_38	76,4	SH	RT054_1	13,8
HM	RT033_20	71,4	MM	RT052_35	13,1
MM	RT033_20	68,9	HH	RT052_35	12,7
SM	RT033_20	63	SS	RT067_22	12,7
HS	RT075_38	41,8	MH	RT052_35	12,6
SH	RT067_22	41,6	SM	RT054_1	10,4
MH	RT067_22	41,4	SH	RT052_35	8,9
HH	RT067_22	41,2	SM	RT052_35	7,4
HM	RT067_22	37,3	HS	RT054_1	5,6
MM	RT067_22	37	MS	RT054_1	2
SM	RT067_22	33	HS	RT052_35	1,2
MS	RT075_38	31,5	MS	RT052_35	0,4
HS	RT033_20	31,3	SS	RT054_1	0,1
MS	RT033_20	27,8	SS	RT052_35	0
SS	RT033_20	26,2			

Si l'on compare les parcelles entre elles, on remarque logiquement qu'en première position se trouvent les parcelles pleinement enherbées (RT033_20 et RT075_38), les plus faibles valeurs concernent les parcelles travaillées, et la parcelle RT067_22 enherbée un inter-rang sur deux présente des valeurs intermédiaires. Ces résultats sont cohérents avec les itinéraires techniques des parcelles. On remarque également un fort effet du climat sur le classement. Pour une même parcelle, c'est le climat printemps/été qui détermine l'ordre (le cumul est calculé sur la même période) : les printemps/été humides engendrent les valeurs les plus importantes, puis ensuite les valeurs correspondantes aux printemps/été moyens, les saisons sèches montrant les plus faibles valeurs.

Il est intéressant de remarquer que le couvert de la parcelle RT067_22 transpire 40 % de plus (en moyenne) dans des conditions moyennes et humides, que le couvert des parcelles pleinement enherbées en saison sèche : l'effet du climat est alors supérieur à l'effet de l'ITK.

Les faibles valeurs pour les parcelles travaillées sont dues à la destruction du couvert début avril.

Discussion des résultats de bilan hydrique

De manière générale, on note des risques de stress élevé dans le bassin versant ; dans la majorité des situations simulées, le stress hydrique éprouvé par les vignes est trop important pour permettre le bon développement de la vigne et l'élaboration de son rendement.

Lors d'années climatiques sèches, toutes les parcelles présentent un déficit hydrique important (Pellegrino et al., 2006, voir résultats « Conséquences sur le rendement »), excepté pour celle ayant un sol relativement profond (2 m de profondeur) avec des remontées capillaires de la nappe. En extrapolant les situations simulées à l'ensemble des parcelles du bassin versant en terme de typologie de sols, on remarque qu'une très faible proportion du bassin du Rieutort est constituée de sols alluviaux profonds : 500 ha soit 10 % du BV. De plus, la région et plus particulièrement le département de l'Hérault sont d'un climat méditerranéen : les saisons sèches sont fréquentes, ce qui complique l'adoption de telles pratiques par les agriculteurs. L'herbe semble parfois pouvoir limiter la perte d'eau en limitant sa transpiration, rendant ce flux inférieur aux flux d'évaporation des sols nus (voir résultats « Evolution de la FTSW et de l'ASW selon les parcelles »), mais le nombre de simulations et de situations comparables est trop faible dans cette étude pour pouvoir valider cette hypothèse.

Pour les autres climats simulés (« MM » et « HH » par exemple), le stress hydrique éprouvé par la vigne est plus limité (Pellegrino et al., 2006, voir résultats « Conséquences sur le rendement ») mais les FTSW sont souvent trop faibles en fin de cycle, et le risque de perte de rendement est présent avec un enherbement.

Dans le cas de sols superficiels comme ceux étudiés dans ce rapport (excepté la parcelle RT054_1), le climat printemps/été est déterminant pour le bilan hydrique des vignes : les réserves hydriques sont faibles et la recharge hivernale des sols perd de son importance. Dans 25 % des années climatiques P/E, les cumuls de pluies sont inférieurs à ceux de la modalité « sec », et le risque de stress hydrique est alors très élevé. De plus, le climat méditerranéen est régulièrement sujet à des phénomènes de canicule (en 2003, 2006) aggravant le risque de stress et de perte de rendement dans les situations enherbées.

On note également l'importance de la caractérisation des réserves hydriques des parcelles. Le fait que 4 parcelles sur 5 éprouvent des stress hydriques trop forts dans les simulations pose des questions par rapport à la représentativité des parcelles de cette étude dans le BV : la production de vin est importante dans la zone (la surface plantée en vigne représente 38 % de la surface de la commune de Murviel-lès-Béziers), et semble montrer que les sols des exploitations viticoles permettent tout de même d'élaborer du rendement malgré les risques de stress hydriques décelés dans cette étude.

Bien que les parcelles aient été sélectionnées pour représenter au mieux les types de sols, une seule parcelle a été analysée pour chaque type de sol et il est difficile de prédire le comportement des autres zones du BV car aucune mesure n'y a été faite notamment concernant la profondeur des sols. La variabilité des sols semble cependant plus faible pour les modalités « fersiallitique » et « alluvial » car ces types ne représentent respectivement que 3 et 10 % des sols du bassin versant. Les sols de type « pierreux et peu profond » représentés par la parcelle RT052_35 correspondent à 42 % de la superficie du BV, et il est alors difficile de généraliser le comportement des parcelles de ces sols à partir d'un seul exemple.

Ce paramètre est déterminant dans la simulation de bilan hydrique, puisqu'il est directement lié à la TTSW des sols. La discrimination entre les parcelles semble d'ailleurs être majoritairement due aux différentes taille de « réservoir hydrique », et l'effet de l'enherbement (permanent, détruit, un IR sur deux) est masqué par l'effet profondeur des sols. Par exemple, la TTSW de la parcelle RT054_1, bien supérieure aux autres, rend difficile toute comparaison par rapport aux ITK appliqués sur ces parcelles.

Les TTSW des parcelles de la simulation sont relativement faibles (33, 81, 88, 137 mm) induisant un risque de stress hydrique trop fort dans certains cas. Les valeurs trouvées dans la littérature (Pellegrino et al 2004, Celette et al., 2008) sont souvent comprises entre 200 et 400 mm. La parcelle

RT052_35 n'a que 50 cm de profondeur de sol, et subit un stress fort d'après les simulations. Il s'agit pourtant d'une des rares parcelles du BV à enherbement permanent. L'approche de la TTSW par la seule profondeur mesurée à la tarière ou lue dans la carte pédologique de France (Carte pédologique de France – Lodève, Bonfils, 1993) ne suffit pas à bien déterminer ce paramètre.

Le choix d'enherber tous les IR ou non dépendra surtout de la TTSW accessible à la vigne et donc de la profondeur des sols : des sols profonds pourront être adaptés à de telles pratiques, car la vigne peut atteindre l'eau en profondeur et la compétition avec le couvert végétal est alors limitée (ce dernier ne possédant pas des racines aussi profondes que la vigne). En revanche, si les sols sont trop superficiels, les contraintes hydriques peuvent être déjà limitantes sans enherbement, à l'instar de la parcelle RT052_35. Il faut alors éviter cette pratique car elle induit une trop forte compétition entre la vigne et le couvert végétal pour la ressource hydrique. **Quelle que soit la recharge hivernale, la pluviométrie printemps-été est déterminante pour la vigne.** Nous notons que l'évolution des réserves hydriques (ASW) et de l'indicateur de stress hydrique FTSW est uniquement liée au climat printemps/été de la simulation. Les courbes évoluent de manière identique selon les 3 modalités pour le climat de cette période (sec, moyen ou humide). Ce constat montre que l'effet de la recharge hivernale est faible dans notre cas, et la quantité de pluie infiltrée dans les sols pendant l'hiver ne limite pas le développement de la vigne. L'herbe, non détruite durant cette période, favorise fortement l'infiltration de l'eau dans le sol et limite les phénomènes de ruissellement. L'enherbement hivernal dans les parcelles de vigne permettrait donc d'améliorer le bilan hydrique des parcelles (Celette et al., 2008), et cette pratique pourrait être adoptée par l'ensemble des viticulteurs du BV.

2.4.2.2 Distribution des stress azotés

a. Comportement azoté des parcelles

Les tableaux 30 et 31 ci-dessous donnent les entrées et sorties d'azote du système. Les entrées ont été calculées à partir de l'estimation de la minéralisation de l'azote organique présent dans les parcelles (analyses chimiques), ainsi que des informations recueillies sur les pratiques de fertilisation des viticulteurs. Les sorties ont été calculées à parti des objectifs de rendement des viticulteurs, en considérant les grappes comme unique export d'azote de la parcelle.

Tableau 30: Entrées d'azote dans le système. K2 : coefficient de minéralisation annuelle.

Sol	Parcelle	K2 (%)	Masse de sol 0-15cm (t/ha)	Taux d'N du sol	Minéralisation annuelle (kg/ha)	Fertilisation (kg/ha)	Total apports (kg/ha)
Fersial.	RT075_38	0,028	1319	0,0007	25,9	58,5	84,4
Molasse	RT033_20	0,025	1184	0,0009	26,6	58,5	85,1
Pierre	RT052_35	0,028	497	0,0016	22,3	31,6	53,9
Transition	RT067_22	0,023	1823	0,0005	21,0	67,5	88,5
Alluvial	RT054_1	0,028	2280	0,0005	31,9	20	51,9

Afin de réaliser les bilans azotés, l'hypothèse d'une culture de la Syrah a été faite. Les enquêtes ont permis de connaître les objectifs de rendement, Si l'information manquait, l'hypothèse a été faire d'un rendement objectif 45 hl/ha ; comme dans l'AOP Saint Chinian. De plus, nous avons considéré les grappes comme unique source d'export d'azote des parcelles : il se peut que certaines feuilles sortent des parcelles lors de la chute, et une partie de l'azote absorbé est immobilisé dans les tissus ligneux sous forme de réserves, ces quantités n'ont pas été comptées pour le calcul de l'azote exporté. On remarque que dans un cas (parcelle de type alluvial RT054_1), les entrées ne sont pas suffisantes pour satisfaire la demande des grappes, une fertilisation supplémentaire pourrait alors être envisagée afin de ne pas épuiser les sols de cette ressource. La fertilisation de la parcelle RT067_22 semble

adaptée, les grappes exportant 80 % des apports. En considérant qu'une partie des feuilles s'exportent également de la parcelle à l'automne, le bilan resterait équilibré.

Tableau 31: Exportations d'azote du système, pour les différentes situations simulées

Sol	Parcelle	Objectif de rendement (hl/ha)	N exporté grappes (Kg/ha)	Ratio N grappe / N apport
Fersial.	RT075_38	45	39,8	0,47
Molasse	RT033_20	45	39,8	0,47
Pierre	RT052_35	25	22,1	0,41
Transition	RT067_22	80	70,8	0,80
Alluvial	RT054_1	80	70,8	1,36

En revanche, la fertilisation des trois autres parcelles semble au moins suffisante sinon excessive par rapport aux objectifs de rendement des viticulteurs (cépage syrah en AOP). On peut alors imaginer une diminution de la fertilisation dans ces situations. Le fait que la minéralisation ait lieu tout au long de l'année, et que l'agriculteur ne puisse pas maîtriser ce phénomène, pousse généralement ce dernier à poursuivre la fertilisation dans le but de contrôler les entrées d'azote dans le système. Une solution pour consommer l'azote excédentaire, et pour les sols ne présentant pas de stress hydrique trop importants, serait la mise en place d'un enherbement dans les IR ou un IR sur deux.

b. Conséquences des modes de gestion sur le bilan azoté

Prélèvement d'azote par l'herbe

La figure 42 représente l'évolution du LAI du couvert tout au long de la simulation (du 1/09 au 31/08). Il est important de noter que pour deux des parcelles, ces courbes sont erronées : le couvert est détruit début avril (Nb jours = 215) pour les parcelles RT054_1 et RT052_35. Le modèle arrête alors la transpiration du couvert (non représentée), mais poursuit la croissance du LAI qu'il ne faut alors pas prendre en compte. Le LAI de la parcelle RT067_22 est également diminué dès le premier travail du sol (1/03, Nb jours = 180), puisqu'un seul IR reste alors enherbé. Si l'on regarde la tendance des courbes dans chaque cas de figure, le LAI atteint un pic autour de 100 jours, ce qui correspond à une période allant du mois de novembre (climat « MM ») au début du mois de décembre. Le deuxième pic de croissance du LAI se situe autour de $j = 275$ (1/06), c'est-à-dire en pleine période de floraison et de prélèvement d'azote par la vigne (Wermelinger 1991). Les pics de croissance du LAI indiquent un fort prélèvement d'azote par le couvert, susceptible d'induire une compétition pour la ressource azotée.

Effet de l'enherbement un IR sur deux

Pour la parcelle RT067_22, l'herbe est détruite au premier mars. Si l'on considère la sénescence du couvert hivernal et que l'herbe détruite se décompose sur la parcelle, l'azote alors restitué au sol pourrait compenser le prélèvement par le couvert de l'IR enherbé à la floraison, limitant ainsi la compétition pour les ressources avec la vigne. Le fait qu'un IR reste enherbé provoque dans tous les cas l'immobilisation d'azote par ce couvert, la ressource n'est alors pas disponible pour la vigne.

Effet d'un enherbement complet sur les IR

Le risque de compétition entre la vigne et le couvert végétal est très présent pour les deux parcelles enherbées, puisque le deuxième pic de croissance du LAI intervient au moment où la vigne commence elle aussi à prélever cet élément dans le sol de manière importante, à la floraison. L'effet sera en revanche moins marqué en période sèche, puisque le couvert se développe peu.

Effet du travail du sol

Les parcelles travaillées début avril voient leur couvert détruit juste avant le deuxième pic de croissance du LAI : l'ITK évite alors la compétition entre la vigne et l'herbe au moment de la floraison. Cependant, le labour étant relativement tardif (02/04), le laps de temps entre la destruction et le début de la floraison pourrait ne pas suffire pour minéraliser l'azote de l'herbe, provoquant également une immobilisation de cette ressource.

Evolution du LAI du couvert

- RT033_20 ○
- RT052_35 ○
- RT054_1 ○
- RT067_22 ○
- RT075_38 ○

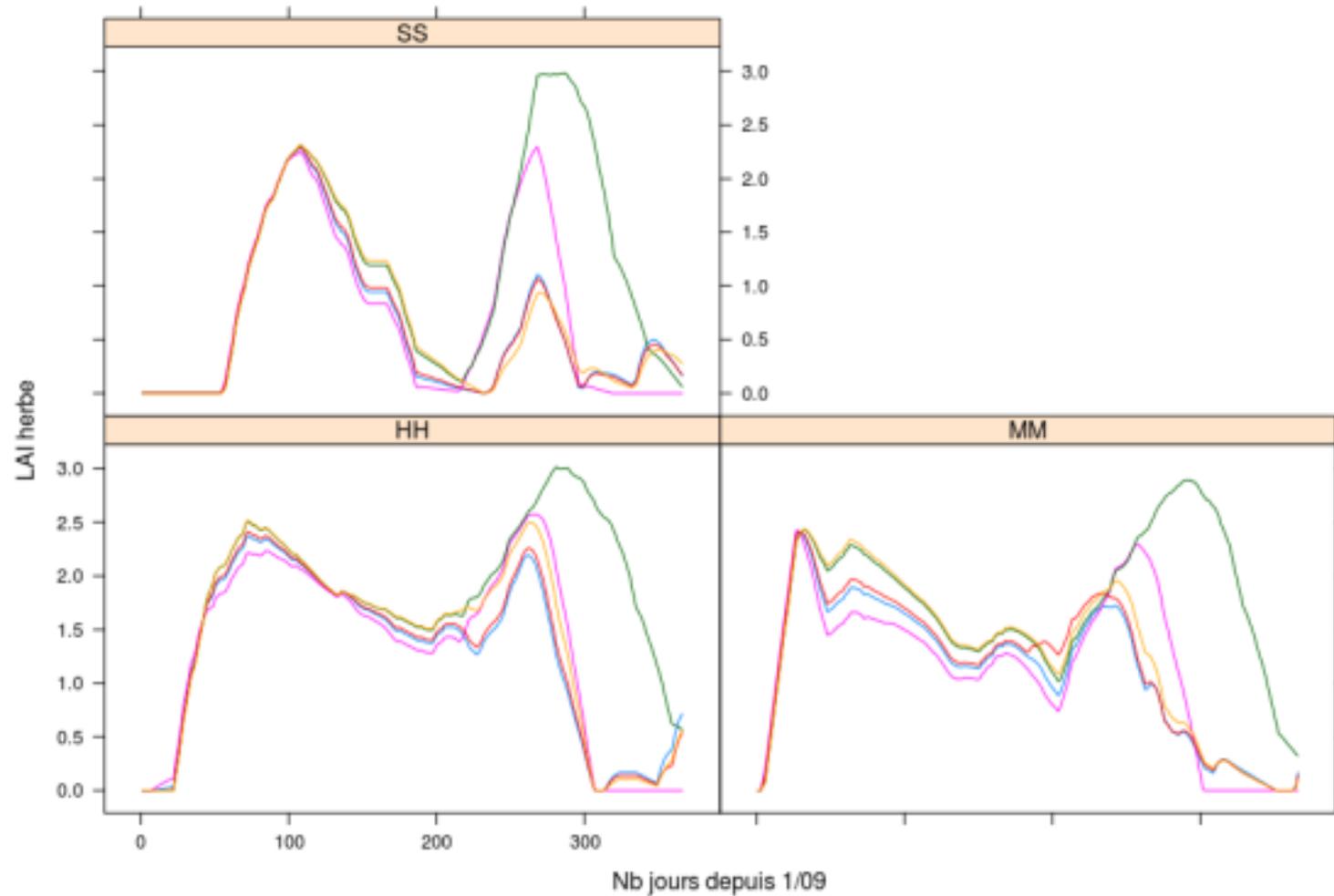


Figure 42: Evolution du LAI du couvert végétal par climat (« SS », « MM » et « HH ») en fonction des 5 parcelles, du 1/09 au 31/08.

Effet de l'enherbement sur la minéralisation

Le prélèvement d'azote par le couvert végétal, qui constitue une concurrence directe avec la vigne pour la ressource, n'est pas la seule action de l'enherbement sur le bilan azoté. En effet le prélèvement d'eau par le couvert provoque une baisse de l'humidité du sol, et de la minéralisation dépendante de l'état hydrique du sol

Afin d'observer l'effet du couvert végétal sur la modification de l'humidité des sols et de la minéralisation, des coefficients ont été recalculés en prenant en compte des facteurs liés à la température et l'humidité. Qu'il y ait de l'herbe ou non dans les parcelles, il est normal de trouver des différences entre le K2 et ces nouveaux coefficients dès lors que les calculs prennent en compte des paramètres supplémentaires. Il est difficile d'observer l'effet de l'herbe à proprement parler : nous ne disposons pas de situations comparables c'est-à-dire de parcelles « identiques » (pédologie, cépage et réserves hydriques similaires) comportant les deux modalités « enherbée » et « non enherbée ». Une telle comparaison aurait permis d'évaluer l'effet d'un enherbement sur la minéralisation de l'azote (Celette et al., 2009).

De plus, les formalismes utilisés sont normalement adaptés à un pas de temps journalier, or nous avons effectué ces calculs sur des moyennes annuelles de température et d'humidité faute de temps pour un travail plus approfondi. Les valeurs des températures et des ASW sont d'une telle différence entre la période hivernale et estivale, qu'elles ont peu de sens rapportées à une moyenne annuelle. Une approche par saison a été envisagée dans cette étude, mais n'a pas pu être réalisée faute de temps. Réaliser les calculs saisonnièrement diminue le lissage des résultats qui intervient lorsqu'une moyenne annuelle d'ASW est calculée. La meilleure approche consisterait à réaliser les calculs au pas de temps journalier, et de faire la somme de toutes les valeurs journalières pour obtenir un indicateur comparable au K2 qui ait plus de sens.

Tableau 32: Comparaison du coefficient de minéralisation annuel K2 avec des coefficients recalculés, en prenant compte des facteurs de température et d'humidité. K2 : coefficient de minéralisation annuel; Mn : coefficient de minéralisation recalculé, f(T) : facteur de température, f(θ) : facteur d'humidité.

Climat	Parcelle	K2	Mn ₁ = K2 x f(T)	Mn ₂ = K2 x f(θ)	Mn ₃ = K2 x f(T) x f(θ)
HH	RT033_20	0,025	0,023	0,018	0,016
MM	RT033_20	0,025	0,024	0,017	0,017
SS	RT033_20	0,025	0,026	0,013	0,013
HH	RT054_1	0,028	0,026	0,022	0,020
MM	RT054_1	0,028	0,027	0,021	0,021
SS	RT054_1	0,028	0,029	0,017	0,018
HH	RT052_35	0,028	0,026	0,018	0,016
MM	RT052_35	0,028	0,027	0,016	0,015
SS	RT052_35	0,028	0,029	0,010	0,010
HH	RT067_22	0,023	0,021	0,017	0,015
MM	RT067_22	0,023	0,022	0,016	0,015
SS	RT067_22	0,023	0,024	0,011	0,012
HH	RT075_38	0,028	0,026	0,021	0,019
MM	RT075_38	0,028	0,027	0,020	0,019
SS	RT075_38	0,028	0,029	0,015	0,016

Le tableau 32 montre différents coefficients de minéralisation de l'azote, calculés en prenant en compte des facteurs liés à la température et à l'humidité du sol. On remarque tout d'abord que si l'on corrige le K2 (coefficient de minéralisation annuel, dépendant uniquement des propriétés physiques et chimiques du sol) avec le facteur de température, il change relativement peu : l'écart moyen⁵ entre les deux variables est de 0,001 seulement, soit un écart relatif moyen de 3,8 %. En revanche, la correction du K2 par l'humidité du sol provoque une baisse importante de ce dernier, puisque l'écart moyen entre les deux variables est alors de 0,0097 et l'écart relatif moyen est de 37 %. A noter qu'en climat « SS », la pondération du K2 par le facteur de température provoque une augmentation du taux de minéralisation : les fortes températures favorisent la minéralisation.

La minéralisation est fortement influencée par l'humidité du sol, celle-ci étant régulée par la transpiration des végétaux. Un enherbement présente le risque de diminuer les réserves en eau du sol, et de freiner la minéralisation de l'azote. La plus forte baisse du taux de minéralisation (Mn₂ par rapport au K2) s'observe pour la parcelle RT052_35 en climat « SS » (de l'ordre de 75 %). Le couvert étant détruit au printemps dans ce cas, les conséquences sur la compétition du couvert avec la vigne sont moindres par rapport aux situations enherbées. On remarque également que la parcelle enherbée un IR sur deux présente une baisse importante du taux de minéralisation en climat « SS » (52 %), supérieure aux parcelles pleinement enherbées : le couvert étant encore présent au printemps, les risques de compétition pour la ressource azotée sont élevés dans ce cas.

Résultats du bilan azoté et estimation des stress azotés

Le bilan azoté a été réalisé en tenant compte des hypothèses suivantes : les vignes sont en cépage Syrah, avec un objectif de rendement réaliste renseigné par l'enquête ou en rendement limité (45 hl/ha) lorsque l'on ne connaît pas les rendements du viticulteur propriétaire de la parcelle.

Compte tenu de ces hypothèses, on remarque qu'en situation non enherbée, les apports sont trop importants dans quatre des cinq situations : Le rapport $\frac{\text{Azote exporté par les grappes}}{\text{Fertilisation azotée}}$ moyen est alors de 0,5. De plus, la pratique courante dans le bassin versant est de fertiliser un IR sur deux, et de changer d'IR chaque année. La vigne étant peu couvrante, on peut imaginer que le risque de perte d'azote par lixiviation lors d'épisodes pluvieux est réel dans ces situations-là. L'enherbement des IR ne poserait donc pas de problème de compétition azotée directe et pourrait constituer un outil permettant de retenir cet azote excédentaire par ses prélèvements. La fertilisation étant généralement effectuée au début du printemps, l'herbe pourrait également retarder la libération d'azote dans les sols (immobilisation par le couvert puis libération après destruction de ce dernier) afin que la fourniture se réalise en même temps que l'augmentation des prélèvements par la vigne. Il faut pour cela que le couvert herbacé ne concurrence pas la vigne pour l'eau, du moins que les réserves hydriques soient suffisantes pour supporter une telle pratique. Dans des cas où l'herbe ne serait pas détruite, un bilan azoté plus fin mérite d'être réalisé, car un pic de prélèvement d'azote est réalisé par le couvert en même temps que la floraison de la vigne, une période sensible pour l'élaboration du rendement.

Pour la parcelle RT054_1 (sol alluvial), les apports sont trop faibles par rapport à l'objectif de rendement du viticulteur. La pratique de l'enherbement augmenterait les exportations d'azote du système, ainsi elle ne devrait être réalisée qu'accompagnée d'une augmentation de la fertilisation.

2.4.2.3 Conséquences des stress hydriques et azotés en terme de perte de rendement

a. Analyse des stress hydriques des parcelles et conséquences pour le rendement

Pellegrino et al (2006) ont permis de définir plusieurs classes de FTSW, définissant autant de niveaux de stress hydrique pour la vigne, influant sur la croissance et le développement de la plante :

- Classe 0 : classe correspondant à une FTSW supérieure à 0,74. Elle est définie comme une situation de référence où aucune fonction de la plante n'est limitée par l'état hydrique du sol.

⁵ Calculé en faisant la moyenne sur les valeurs de $|K2 - Mn|$ avec $Mn = K2 \times \dots$

- Classe 1 : la FTSW est ici comprise entre 0,6 et 0,74, et l'émergence des feuilles des rameaux secondaires est alors réduite.
- Classe 2 : $0,6 > \text{FTSW} > 0,5$; élongation des entre-nœuds des rameaux primaires réduite.
- Classe 3 : $0,5 > \text{FTSW} > 0,33$; l'émergence des feuilles sur les rameaux primaires est réduite.
- Classes 4 à 7 : $\text{FTSW} < 0,33$; toutes les fonctions de la plante sont atteintes.

Optimal change over time of the classes of the indicator of vine water status (see Fig. 1) for a quality red wine production. The relevant phases for yield and grape quality were limited by the phenological stages. Values in parenthesis represent the E-L number of these phenological stages (Coombe, 1995). The main processes characterising these phases are indicated

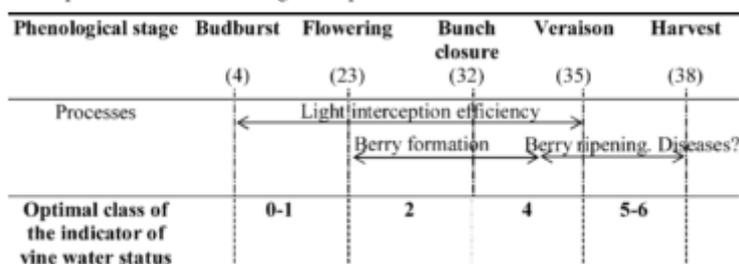


Figure 43: Classes de FTSW optimales en fonction de la phénologie de la vigne (Pellegrino et al., 2006)

La figure 43 est issue de ces travaux, indiquant des classes optimales de FTSW en fonction des stades physiologiques de la vigne pour le cépage Syrah.

- Débourrement - floraison : durant cette période, les classes 0 et 1 permettent à la plante une production maximale d'assimilats ainsi qu'une efficacité d'interception lumineuse optimale.
- Floraison - fermeture de la grappe : la classe 2 permet une diminution du nombre d'organes végétatifs puits (diminution de l'émergence des feuilles sur rameaux 2^{aires} et de l'élongation des rameaux primaires) tout en maintenant un niveau de production d'assimilats maximum.
- Fermeture - véraison: la classe 4 maintient l'assimilation de carbone à des valeurs hautes (>61 %), et inhibe la croissance végétative, en faveur de la maturation des baies.
- Véraison – vendange: les classes 5 et 6 permettent une forte inhibition de la croissance végétative et la FTSW permet de maintenir l'assimilation nette à un taux supérieur à 20 %.

La figure 44 illustre l'évolution de la FTSW dans trois climats distincts (SS, MM, HH), et présente également les classes optimales de FTSW en fonction des différents stades physiologiques de la vigne. Le tableau 33 aide à la lecture de la figure 44 en établissant la correspondance entre les numéros de jours après débourrement, les dates et les stades physiologiques.

En climat sec, 4 parcelles sont toujours en dessous du seuil optimal, sauf lors de la dernière période allant de la véraison à la récolte. Il y a donc un risque pour que le développement végétatif de la plante ne soit pas réalisé dans de bonnes conditions : efficacité d'interception de la lumière et production d'assimilats réduits, et faible croissance végétative de la plante entre la période débourrement-floraison. Le stress hydrique est avéré à la fin de cette période : la floraison risque d'être perturbée, induisant une baisse du rendement de l'année n. De plus, le stress subi par ces parcelles durant l'année n peut perturber l'induction et la différenciation des inflorescences dans les bourgeons en formation, et réduire également le rendement de l'année n+1. On remarque que la FTSW de la parcelle RT054_1 reste dans les classes de Pellegrino et al. (2006): la vigne ne subit pas de stress hydrique important, et son rendement pourrait être optimal (si le stress hydrique est le seul facteur limitant, sans considérer l'état sanitaire de la vigne ainsi que sa nutrition minérale). Il est important de souligner l'importance de la profondeur du sol sous la vigne lors de climats très secs : seule la vigne ayant une forte TTSW évite un stress hydrique qui pénaliserait son rendement.

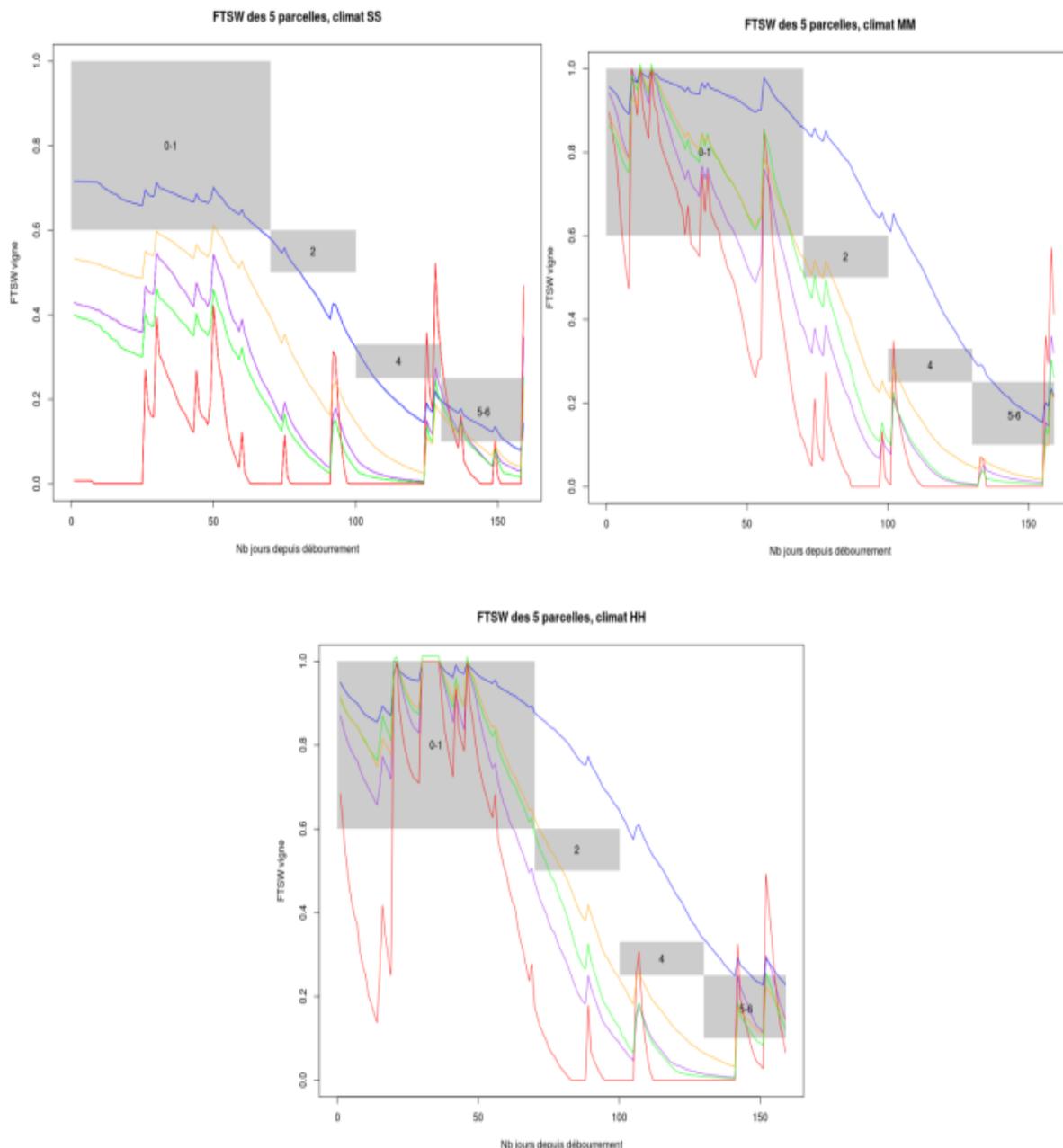


Figure 44: Evolution de la FTSW des 5 parcelles, du débourrement à la floraison, pour les climats « SS », « MM » et « HH ». En rouge : parcelle RT052_35 ; en vert : parcelle RT067_22 ; en violet : parcelle RT033_20 ; en orange : parcelle RT075_38 ; en bleu : parcelle RT054_1. Les polygones gris représentent respectivement les périodes « Débourrement-Floraison », « Floraison-Fermeture de la grappe », « Fermeture-Véraison » et « Véraison-Récolte », les classes optimales de FTSW définies par Pellegrino et al. (2006) sont indiquées dans chaque polygone.

Tableau 33: Correspondance entre stades physiologiques de la vigne et nombre de jours correspondants dans la simulation.

Stade physiologique :	Débourrement-floraison	Floraison-fermeture	Fermeture-véraison	Véraison-récolte
Date :	26/03 - 1/06	1/06 - 1/07	1/07 - 1/08	1/08 - septembre
Numéro jours :	0-70	70 - 100	100 - 130	130 - 160

En climat « MM » et « HH », les comportements des parcelles sont assez similaires. Le groupe formé par les parcelles RT075_38 (enherbée) et RT067_22 (enherbement un IR sur deux) évolue dans le même sens : leur FTSW est dans les classes de valeurs optimales pendant les périodes de

croissance végétative et de formation des baies (jusqu'à fermeture), elle est ensuite en deçà des conditions optimales pour la véraison. La croissance végétative n'est pas limitée et la floraison s'effectue dans de bonnes conditions, en revanche les baies risquent d'être moins chargées en eau et concentrées en sucres étant donné les faibles réserves hydriques des sols. Le rendement pourrait alors être diminué, mais la qualité des baies pourrait permettre au viticulteur d'élaborer un vin de qualité supérieure (AOP par exemple, rendements limités).

Le risque de stress est supérieur pour la parcelle RT033_20 car sa FTSW passe sous le seuil de 0.6 avant floraison, ce qui peut gêner ce processus et réduire le rendement. La parcelle RT052_35 est en stress permanent: sa FTSW se trouve dans la classe de valeurs optimales pour la 1^{ère} période, et la courbe montre des pics avec de fortes variations de sa réserve hydrique. Ces variations sont susceptibles d'induire des stress ponctuels pouvant gêner le développement de la plante. Pour les autres périodes (sauf après véraison), ses valeurs de FTSW sont en permanence sous les classes optimales, et le rendement risque d'être très réduit. La FTSW de la parcelle RT054_1 est systématiquement au-dessus des valeurs optimales dans les climats moyens et humides : le rendement est alors assuré (au point de vue « stress hydrique »), mais la qualité des baies risque d'être moindre. Pour élaborer un fruit de qualité, il est important que la vigne subisse des stress hydriques pendant des périodes ciblées. Ici le développement végétatif risque d'être trop important lors de la floraison, gênant le processus et défavorisant le développement des fruits. De plus, une vigueur trop importante de la vigne favorise le développement de maladies avec des conséquences néfastes sur le rendement (Valdés-Gomez et al., 2009). La pratique de l'enherbement pourrait permettre d'augmenter le stress hydrique de la vigne afin que sa FTSW reste dans les classes de valeurs optimales.

En climat sec, quatre des cinq parcelles sont systématiquement en dessous du seuil optimal, mis à part lors de la dernière période allant de la véraison à la récolte. Il y a donc un risque pour que le développement végétatif de la plante ne soit pas réalisé dans de bonnes conditions : efficacité d'interception de la lumière et production d'assimilats réduits, et faible croissance végétative de la plante entre la période débourrement-floraison. Le stress hydrique est avéré à la fin de cette période : la floraison risque d'être perturbée, induisant une baisse du rendement de l'année n. De plus, le stress subit par ces parcelles durant l'année n peut perturber l'induction et la différenciation des inflorescences dans les bourgeons en formation, et réduire également le rendement de l'année n+1. On remarque cependant que la FTSW de la parcelle RT054_1 reste dans les classes de Pellegrino et al. (2006): la vigne ne subit pas de stress hydrique trop important, et son rendement pourrait être optimal (si l'on considère le stress hydrique comme unique facteur limitant, sans considérer l'état sanitaire de la vigne ainsi que sa nutrition minérale). Il est important de souligner l'importance de la profondeur du sol sous la vigne lors de climats très secs : seule la vigne ayant une forte TTSW évite un stress hydrique qui pénaliserait son rendement.

En climat « MM » et « HH », les comportements des parcelles sont assez similaires. Le groupe formé par les parcelles RT075_38 (enherbée) et RT067_22 (enherbement un IR sur deux) évolue dans le même sens : leur FTSW est dans les classes de valeurs optimales pendant les périodes de croissance végétative et de formation des baies (jusqu'à fermeture), elle est ensuite en deçà des conditions optimales pour la véraison. La croissance végétative n'est pas limitée et la floraison s'effectue dans de bonnes conditions, en revanche les baies risquent d'être moins chargées en eau et concentrées en sucres étant donné les faibles réserves hydriques des sols. Le rendement pourrait alors être diminué, mais la qualité des baies pourrait permettre au viticulteur d'élaborer un vin de qualité supérieure (AOP par exemple, rendements limités).

Le risque de stress est supérieur pour la parcelle RT033_20 car sa FTSW passe en dessous du seuil de 0.6 avant la floraison, ce qui pourrait gêner ce processus physiologique et réduire le rendement. La parcelle RT052_35 est en revanche en stress permanent : sa FTSW se trouve dans la classe de valeurs optimales pour la première période seulement, et la courbe montre des pics témoignant de fortes variations de sa réserve hydrique. Ces variations sont alors susceptibles d'induire des stress ponctuels pouvant gêner le développement de la plante. Pour les autres périodes (sauf après

véraison), ses valeurs de FTSW sont en permanence en dessous des classes optimales, et le rendement risque d'être très fortement réduit. Enfin, la FTSW de la parcelle RT054_1 est systématiquement au-dessus des valeurs optimales dans les climats moyens et humides : le rendement est alors assuré (d'un point de vue « stress hydrique »), mais la qualité des baies risque d'être moindre. En effet, pour élaborer un fruit de qualité, il est important que la vigne subisse certains stress hydriques pendant des périodes ciblées (Pellegrino et al., 2006). Ici le développement végétatif risque d'être trop important lors de la floraison, gênant le processus et défavorisant le développement des fruits. De plus, une vigueur trop importante de la vigne favorise le développement de maladies pouvant avoir des conséquences néfastes sur le rendement (Valdés-Gomez et al., 2009). La pratique de l'enherbement pourrait ici permettre d'augmenter le stress hydrique de la vigne afin que la FTSW de celle-ci reste dans les classes de valeurs optimales.

L'enherbement permet de réduire la croissance végétative de la vigne lorsque cela est nécessaire, et constitue ainsi un outil de pilotage du rendement et de la qualité de la production (rendements limités dans le cas d'appellation, par exemple).

b. Estimation des pertes de rendement dues aux modes de gestion des sols

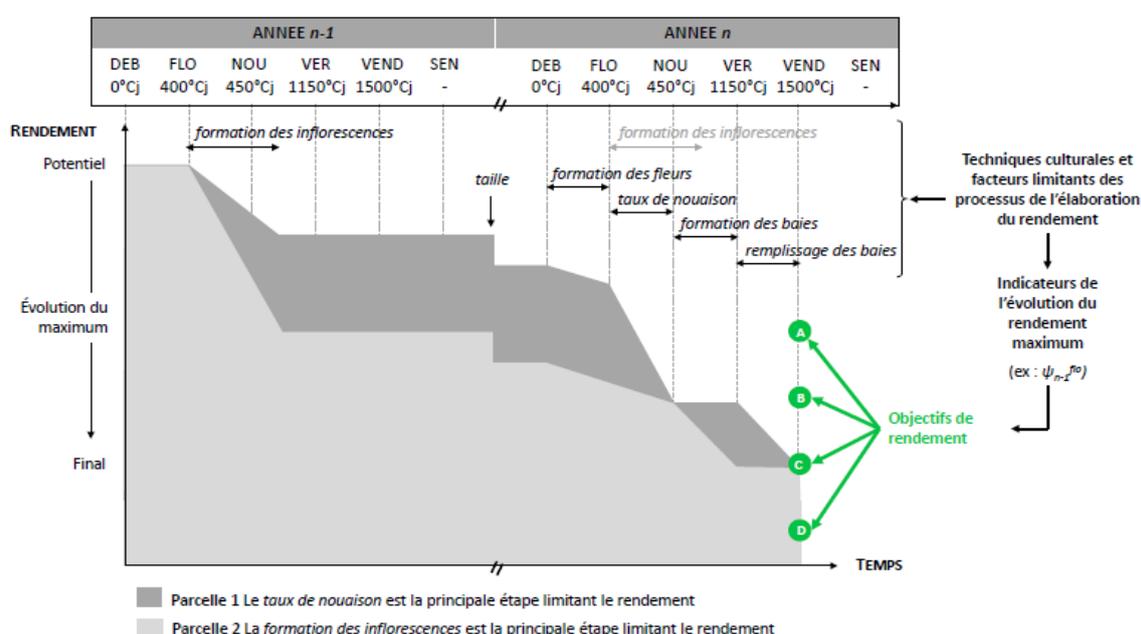


Figure 45: Du rendement potentiel au rendement final : l'évolution du maximum comme un indicateur de pilotage du rendement de la vigne (d'après Guilpart, 2014).

Le rendement potentiel d'une parcelle est défini par le climat, le type de sol, la densité de plantation et le cépage (van Ittersum et al., 2013). Chaque étape de l'élaboration du rendement, si elle est limitée par l'occurrence d'un facteur limitant, réduit successivement le rendement potentiel à une valeur maximum atteignable à la vendange. Si l'effet des facteurs limitants sur chaque étape de l'élaboration du rendement est connu et quantifié (e.g. effet du stress hydrique à la floraison de l'année n-1 sur la formation des inflorescences (Guilpart et al., 2014), alors des indicateurs de l'évolution du rendement maximum peuvent être calculés et confrontés à l'objectif de rendement. Cette confrontation peut être une base pour raisonner l'adaptation des pratiques culturales pour atteindre l'objectif de rendement. La figure 45 représente deux parcelles qui diffèrent par l'intensité de la réduction du maximum associée à chaque étape du rendement et 4 objectifs de rendements, dont deux ne peuvent être atteints (A et B), un atteint (C) et un dépassé (D). La parcelle 1 représente un cas dans lequel le taux de nouaison est la principale étape limitant le rendement (e.g. dans les vignobles septentrionaux). La parcelle 2 représente un cas dans lequel la formation des inflorescences est la principale étape limitant le rendement (e.g. en climat méditerranéen comme dans notre expérimentation au champ).

Sur la base des simulations de FTSW réalisés, le FTSW moyen à la floraison a été calculé et comparé au **FTSW cible de 0,58** à cette période (Pellegrino et al. 2006) afin de calculer un facteur de réduction du rendement lié au stress hydrique (Tableau 34)

Tableau 34: FTSW moyen à la floraison pour les différentes parcelles suivant les années climatiques et facteur de réduction du rendement associé

Sol	Parcelle	FTSW simulé moyen à la floraison			Facteur de réduction du rendement dû au stress hydrique = FTSW moyen/ FTSW objectif		
		Année SS	Année MM	Année HH	Année SS	Année MM	Année HH
Alluv	RT054_1	0.6	0.8	0.9	1,00	1,00	1,00
Fersial	RT075_38	0.4	0.55	0.6	0,69	0,95	1,00
Molasse	RT033_20	0.2	0.4	0.45	0,34	0,69	0,78
Pierre	RT052_35	0.18	0.5	0.55	0,31	0,86	0,95
Transition	RT067_22	0	0.2	0.3	0,00	0,34	0,52

Le tableau 35 synthétise les simulations de stress hydrique et azotés en fonction des modalités de gestion des sols retenus sur les parcelles types pour 3 années types. L'estimation d'éventuelle perte de rendement associée à la modalité de gestion est faite sur la base du stress hydrique à la floraison.

On peut distinguer deux cas de figure :

- les parcelles sur sol alluvial, fersialitique et de transition pour lesquels les modalités de gestion retenues en fonction des stratégies permettent de réaliser le rendement objectif toutes les années (alluvial) ou au moins une année sur deux (fersialitique et transition). L'ajustement de la fertilisation, sous des formes facilement accessibles à la plante, notamment en cas d'année un peu sèche doit cependant est réalisé.
- les parcelles (molasse et pierre) pour lesquelles le rendement objectif risque d'être très fortement pénalisé par les modalités de gestion retenues compte tenu des stratégies spatialisées.

Tableau 35: Synthèse des effets des modalités d'entretien du sol sur les rendements en considérant 3 années types (année humide, année moyenne et année sèche)

Parcelle	Type de sol	Rendement objectif	Modalités d'entretien du sol affectées pour la stratégie 1a	Modalités d'entretien du sol affectées pour la stratégie 2a	Risque de stress hydrique	Risque de stress azoté	Rendement attendu pour année sèche SS	Rendement attendu pour année sèche MM	Rendement attendu pour une année humide HH	Acceptabilité de la modalité d'entretien du sol au vu des risques de pertes de rendement
RT054_1	Alluvial	80	Enherbement permanent, sur toute la surface jusqu'au printemps et désherbage mécanique du rang à partir du 1/03 (S5)	Idem que 1a mais désherbage chimique du rang au printemps (S5')	Pas de stress	Risque de stress azoté fort	Pas de perte de rendement si complément de fertilisation (forme liquide) apporté	Pas de perte de rendement si complément de fertilisation apporté	Pas de perte de rendement si complément de fertilisation apporté	Acceptable quel que soit le climat de l'année
RT033_20	Molasse	45	Enherbement permanent, sur toute la surface jusqu'au printemps et désherbage mécanique du rang à partir du 1/03 (S5)	Idem que 1a mais désherbage chimique du rang au printemps (S5')	Stress important en année sèche	Pas de stress	- 66 % du rendement objectif	-31% du rendement objectif	à -22 % du rendement objectif	Difficilement acceptable, gestion de l'enherbement délicate
RT075_38	Fersialitique	45	Enherbement permanent, sur toute la surface jusqu'au printemps et désherbage mécanique du rang à partir du 1/03 (S5)	Idem que 1a mais désherbage chimique du rang au printemps (S5')	Stress modéré	Pas de stress	- 31 % du rendement objectif	- 5 % du rendement objectif	Pas de perte de rendement	Acceptable les années moyennes et humides au moins 6 années sur 9)
RT052_35	Pierre peu profond	20	Enherbement hivernal sur toute la surface, rang et inter-rangs desherbés mécaniquement à partir du printemps (herbe détruite) (S1)	Idem que 1a mais désherbage chimique du rang au printemps (S1')	Stress important et permanent	Pas de stress	Rendement très pénalisé (0 d'après estimation)	-83 % du rendement objectif	- 66% du rendement	Inacceptable car les réserves hydriques du sol sont insuffisantes
RT067_22	Transition	80	Enherbement hivernal sur toute la surface, travail du rang et d'un IR sur deux à partir du printemps (1 IR sur 2 enherbé) (S3)	Idem que 1a mais désherbage chimique du rang au printemps (S3')	Stress modéré	Risque de stress azoté	-66 % du rendement objectif	-14 % du rendement objectif	à - 5% du rendement objectif avec complément de fertilisation à prévoir	Acceptable les années humides et certaines années sèches (1 année sur 2 environ)

2.4.3 Discussion - Conclusion

L'utilisation des modèles de bilan hydrique et azoté a permis d'estimer les pertes de rendement associées aux différentes modalités d'entretien des sols du bassin versant pour les différents types de sol, pour les différents climats du bassin versant. Ces risques de perte de rendement sont à considérer avec précaution compte tenu des hypothèses faites sur : (i) la caractérisation du fonctionnement hydrique de la parcelle (le modèle Walis ne prend pas en compte les remontées capillaires ; (ii) la caractérisation de la dynamique de prélèvement d'azote par l'enherbement et (iii) l'utilisation de la relation de proportionnalité établie par Guilpart et al. (2014), en vignoble de syrah méditerranéen entre le niveau de satisfaction des besoins de la vigne en eau à floraison et la perte de rendement à l'ensemble des parcelles viticoles du bassin versant étudiées.

L'évaluation des effets des contraintes hydriques et azotées simulées sur le rendement sous l'effet des scénarios de réduction des herbicides met en avant le caractère acceptable de ces scénarios pour les parcelles sur sols profonds. Ainsi, en situation d'année climatique humide, la stratégie d'enherbement est acceptable du point de vue du rendement pour trois parcelles (alluvial, molasse et transition) car elle induit soit une conservation des rendements, soit une diminution légère (5 %). Par contre, sur les sols de type transition ou pierre superficiel, on note que les modalités de gestion des sols génèrent des baisses de rendement inacceptables pour le producteur. Ce résultat est en apparence contradiction avec la carte d'aptitude établie lors de l'étude préliminaire du projet, mais peut s'expliquer par le fait d'avoir pris plus finement en compte (i) la caractérisation des réserves hydriques des sols ; (ii) la nature et la dynamique de croissance de l'enherbement spontané du bassin ; (iii) le bilan d'azote des parcelles viticoles et (iv) la dynamique azotée des sols et (iii) la variabilité climatique du bassin versant, à travers la génération de 9 climats types.

Au final, les différences entre les parcelles semblent dépendre plus fortement de leur statut hydrique que de leurs modes de gestion respectifs. Le facteur déterminant dans l'acceptabilité est la variabilité climatique très importante de la région et suggère que les pratiques d'entretien des sols doivent être ajustés chaque année pour cadrer avec la réalité climatique et les contraintes subies par la vigne.

2.5 Evaluation des flux de ruissellement d'eau et de pesticides à l'échelle du bassin versant pour chaque stratégie

L'évaluation des flux de ruissellement doit permettre de hiérarchiser les différentes stratégies étudiées vis à vis de leur impact en termes de contamination de l'eau et ainsi d'en mesurer les gains potentiels.

2.5.1 Paramétrage de la modélisation

2.5.1.1 Paramètres globaux

a. Climat

Le modèle utilise 4 variables météorologiques toutes issues de l'observatoire de Roujan qui se situe à 15 km du bassin versant du Rieutort avec un climat comparable. Ces données sont :

- la pluie horaire ($m.h^{-1}$) ;
- la température moyenne horaire ($^{\circ}C$) ;
- l'évapotranspiration de référence ' ET_0 ' ($m.h^{-1}$), calculée par la méthode de Penman-Monteith suivant les recommandations de Richard et al (2006) ;
- le rayonnement solaire R_g ($MJ.m^{-2}$).

Ces variables caractérisent les scénarios climatiques présentés au § 2.1. Notons que pour les simulations nous avons fait l'hypothèse d'une uniformité de climat sur l'ensemble du bassin versant du Rieutort. Toutefois, en comparaison à d'autres zones du piémont cévenol, il existe très certainement un gradient pluviométrique nord-sud lié au gradient d'altitude. L'absence de stations météorologiques sur le bassin du Rieutort permettant d'estimer ce gradient ne nous a pas permis de le prendre en compte.

b. Topologie

Pour la modélisation hydrologique, le paysage est représenté par plusieurs types d'entités :

- Les SU : unités de surface qui représentent une surface au sol.
- Les GU : unités de subsurface qui représentent un volume de sol sous la surface.

Ces entités sont divisées en 3 sous unités pour certains calculs, représentant le rang et deux types d'inter-rang. Ces sous unités ont les mêmes caractéristiques que l'unité de base mais représentent chacune 1/3 de sa surface. Cela permet de distinguer 3 pratiques culturales différentes dans une parcelle.

- Les RS : entités qui représentent les tronçons du réseau hydrographique et linéaires de fossés.

Pour toutes ces entités, on définit :

- leurs connections (entité aval – amont) qui constituent la topologie du réseau d'écoulement ;
- leurs caractéristiques intrinsèques, dont le détail est présenté plus loin en explication du paramétrage des différentes parties du modèle.

Le modèle Mhydas simule les écoulements à l'échelle du bassin versant, par conséquent il faut définir le sens de ces écoulements entre les parcelles voisines, entre les parcelles et les fossés et entre les parcelles et le sol. Le logiciel Géo-Mhydas a été conçu pour calculer ces connections. Je décris ci-dessous les choix fait à travers l'utilisation de ce logiciel.

Le calcul de la topologie se fait à l'aide du logiciel Géo-Mhydas (Lagacherie et al., 2010) à partir du réseau hydrographique, du parcellaire (Figures 3 et 4) et du modèle numérique de terrain. Le logiciel calcule l'altitude moyenne de chaque entité puis définit l'entité aval comme l'entité voisine ayant l'altitude la plus basse. Cela permet de définir l'ordre de calcul des écoulements par le modèle hydrologique qui commence par simuler les flux issus des parcelles situées à l'amont. Le débit à leur exutoire permet de simuler le fonctionnement hydrologique des parcelles et fossés situés à leur aval.

On illustre le résultat de ce calcul par la figure suivante :

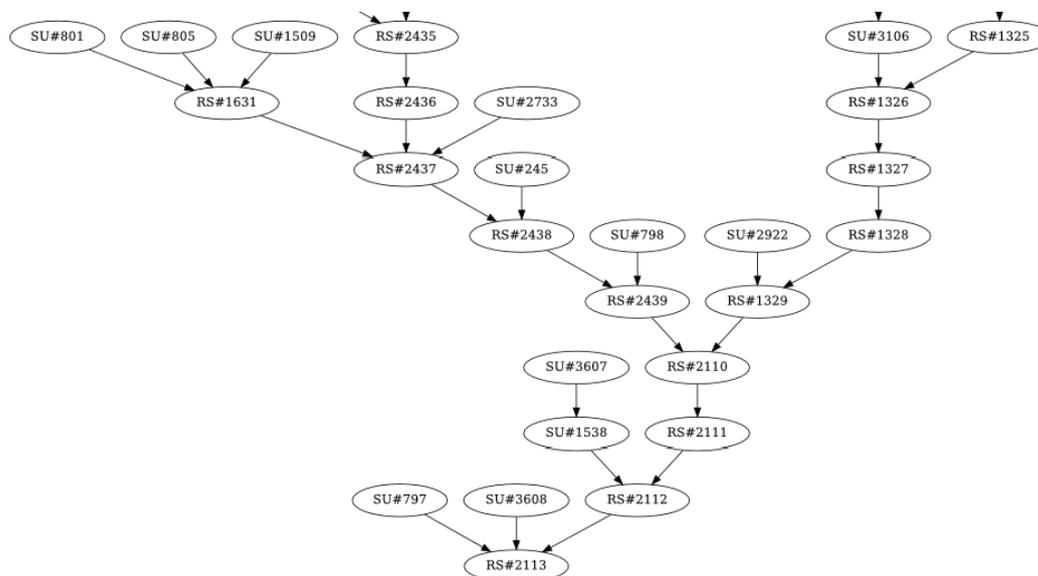


Figure 46: Schéma des connectivités entre SU de la zone proche de l'exutoire du Rieutort

Sur la figure 46 les unités SU et RS sont représentées par la même forme ovale. Les GU ne sont pas représentées, car nous avons choisi de représenter le sol avec une GU pour chaque SU. Il n'existe pas de connections entre GU car les flux de subsurface ne sont pas représentés dans cette étude. Ils sont supposés négligeables en termes de transfert de polluants dans le contexte hydrologique du Rieutort, proche de celui du bassin de Roujan.

c. Opérations culturales

Le modèle Dhivine fournit des dates d'opérations culturales qui sont utilisées comme paramètres d'entrée du modèle hydrologique sous OpenFLUID. Les opérations culturales sont spatialisées à la résolution de la sous unité de parcelle (rang, inter-rang). Elles ont chacune un impact sur le partage infiltration/ruissellement et/ou sur le stock d'herbicide dans le sol. Par exemple un travail du sol met à 0 la couverture végétale et la surface foliaire des adventices. Cela entraîne un changement d'état de surface, qui dans le cas présent devient celui d'un sol travaillé à forte porosité, et dont la conductivité hydraulique à saturation prend sa valeur maximale, K_s max.

Les opérations culturales sont prises en compte par les simulateurs 'Germination', 'Croissance de l'herbe', 'Dynamique d'évolution des EDS' et le simulateur qui calcule la quantité de pesticide qui sort des parcelles.

2.5.1.2 Paramétrage du bilan hydrique

a. Représentation des horizons de sol modélisés

Au-delà des différences intrinsèques au plan pédologique, du fait du système de culture viticole on peut distinguer 3 horizons majeurs en sols viticoles :

- 0-20 cm : H1, horizon de surface sous l'influence directe des modes d'entretien du sol
- 20-60 cm : H2, horizon intermédiaire, encore sous influence des pratiques du fait des risques de tassement et de compaction du sol que ces dernières génèrent.
- 60 cm-roche mère: H3, sol plus profond, peu influencé au plan de sa structure par les pratiques, siège d'une densité et d'extraction racinaires encore significatives jusqu'à environ 2 m dans le cas de la culture de la vigne (Trambouze et Voltz, 2001).

Dans la suite nous considérons la variabilité des propriétés de sol selon ces trois horizons, qui se surimposent aux horizons pédologiques naturels des différents types de sols rencontrés sur le Rieutort.

Pour la modélisation, on considère un profil de sol de 2 m de profondeur pour tenir compte de l'ensemble de la zone racinaire potentielle. Le profil est découpé en 10 couches de 10 cm entre la surface et 1 m de profondeur et en 2 couches de 50 cm entre 1 et 2 m de profondeur.

b. LAI

Comme indiqué précédemment, le modèle prend en compte les adventices et la vigne dans le calcul de l'indice foliaire. Celui des adventices est calculé par la modélisation du développement des adventices et celui choisi pour la vigne correspond à une évolution standard d'indice foliaire de vigne tel qu'observé sur des vignes du bassin versant de Roujan. En toute rigueur, des évolutions différentes de l'indice foliaire de la vigne devraient être considérées en fonction des cépages, des états hydriques du sol à l'échelle annuelle et de certaines opérations culturales telles que le rognage. Les données nécessaires pour cela ne sont malheureusement pas disponibles. Par ailleurs, la prise en compte de cette variabilité n'aurait eu qu'une influence mineure sur la comparaison de l'impact environnemental des stratégies. Notons enfin, que pour les entités non viticoles, essentiellement garrigues et friches, l'indice foliaire a été considéré constant et égal en moyenne à 2.

c. Le sol et ses caractéristiques hydrodynamiques

Le modèle nécessite la connaissance de la variabilité de la conductivité hydraulique à saturation, K_s . Ce paramètre est notamment nécessaire pour la modélisation du bilan hydrique.

Sur la base de références expérimentales acquises sur les sols du bassin versant de Roujan (Coulouma et al, 2006), nous avons estimé par analogie la variabilité des valeurs de K_s pour les 3 horizons mentionnés des sols du Rieutort, présentés en début de rapport dans la Figure 5. Les choix effectués sont récapitulés dans le tableau 36.

Tableau 36: Valeurs estimées de K_s pour chaque horizon des sols du Rieutort (en m/s). Les numéros de sols indiqués sont les mêmes que ceux utilisés dans la figure 5 qui présente la typologie de sol établie.

horizon\sols	1	2	3	4	5
H1	2,8E-5	2,8E-5	2,8E-5	2,8E-5	2,8E-5
H2	2,8E-5	2,8E-6	2,8E-6	2,8E-6	2,8E-5
H3	2,8E-6	2,8E-6	2,8E-6	2,8E-6	2,8E-6

d. Densité apparente – création d'une classification

La variabilité des densités apparentes a été estimée en fonction du taux de cailloux du sol et de la nature de l'horizon selon le tableau 37, construit à partir d'observations réalisées sur les sols de la plaine Languedocienne (comm. pers. G. Coulouma, UMR LISAH).

Tableau 37: Valeur estimée de la densité apparente du sol en fonction de la nature de l'horizon et du taux de cailloux. Horizon 1 : 0-20 cm, Horizon 2 : 20-60 cm et Horizon 3 : > 60 cm.

Densité apparente	Horizon	Taux de cailloux
1,3	1	< 40 %
1,4		> 40 %
1,5	1 ou 2	< 40 %
1,6		> 40 %
1,6	2 ou 3	< 40 %
1,7		> 40 %

A partir de cette classification, nous avons choisi une valeur de densité apparente pour chaque horizon de chaque sol. Ce choix est présenté en annexe A4.

e. Teneur en eau résiduelle après séchage à l'air

Nous avons estimé la teneur en eau résiduelle à partir de la texture selon une fonction de pédo-transfert proposée par le logiciel RETC (van Genuchten et al, 1991) (voir annexe A5). Cette valeur est utilisée notamment pour le calcul du stock normalisé à partir de la teneur en eau.

f. Teneur en eau à saturation

Nous avons considéré que la teneur en eau saturation est égale à la valeur de porosité du sol, calculée à partir de la densité apparente et de la densité de solide du sol. Cette dernière a été prise égale à 2,7 à défaut de mesures disponibles sur les sols du bassin. La teneur en eau à saturation est utilisée par le simulateur 'Germination' et par les simulateurs du bilan hydrique. Les valeurs estimées sont indiquées en annexe A5.

g. Paramètres du calcul de l'évaporation

Coefficient de Beer-Lambert : nous avons choisi $\alpha = 0,5$.

a, b et c : paramètres de l'équation de Van Keulen du simulateur 'Evaporation'. Nous avons choisi $a = 0,15$; $b = 800$ et $c = 6,24$ conformément aux calibrations effectuées par Trambouze (1996) sur des cycles d'évaporation du sol en parcelle viticole languedocienne.

h. Paramètres du calcul de la transpiration

Les paramètres d et e de l'équation (1) sont le minimum et le maximum du rapport TR/TP. Nous les avons fixés à $d = 0$ pour le min et $e = 1,12$ pour le max selon la valeur estimée par Trambouze et Voltz (2001).

2.5.1.3 Paramétrage de la partie hydrologique

a. $K_{s,max}$ et $K_{s,min}$ (m/s)

La conductivité hydraulique à saturation de la couche de surface du sol est calculée par le simulateur 'Dynamique d'évolution des EdS'. Ce simulateur estime la variation de K_s en fonction de l'EdS entre les valeurs maximum et minimum suivantes: $K_{s,max} = 8,3 \text{ E-6 m/s} = 30 \text{ mm.h}^{-1}$ et $K_{s,min} = 2,8 \text{ E-6 m.s}^{-1} = 10 \text{ mm.h}^{-1}$. Ces valeurs sont issues des travaux de caractérisation hydrodynamique, menés sur les EdS (Andrieux et al., 2001 ; 2006) et correspondent à des valeurs caractéristiques mesurées sur sol récemment travaillé pour $K_{s,max}$ et mesurées sur croûte structurale consolidée pour $K_{s,min}$. Ces valeurs sont peu variables sur la gamme de sols considérée sauf si ceux-ci présentent des charges caillouteuses significatives.

b. calage du K_s de la surface du sol

Le modèle construit utilise la pluie horaire. Ceci écrête beaucoup les pics réels d'intensités de pluie à l'origine du ruissellement et diminue artificiellement les valeurs simulées de ruissellement. Pour compenser, nous avons calé avec un coefficient multiplicateur la valeur du K_s de la surface du sol estimé par le simulateur 'Dynamique d'évolution des EdS'. L'objectif du calage est d'assurer que le ruissellement de surface issu des parcelles viticoles soit compris dans les valeurs de ruissellement annuel présentées dans le tableau 38. Celui-ci donne les intervalles observés du ruissellement annuel de parcelles viticoles, à savoir 20 à 54 % pour les parcelles désherbées chimiquement sur toute leur surface et de 11 à 25 % pour celles désherbées chimiquement sur le rang et labourées sur l'inter-rang (Louchart et al., 2001b).

Tableau 38: Valeurs observées du ruissellement de surface aux échelles de la parcelle et d'un bassin versant de 91 ha en milieu viticole méditerranéen (Louchart et al., 2001a)

		94/95	95/96	96/97	97/98	98/99	99/00
No-till field	rainfall	687	938	1203	850	281	771
	runoff	198	214	238	282	70	413
	average RC	10%	17%	14%	22%	11%	28%
	annual RC	29%	23%	20%	33%	25%	54%
Tilled field	rainfall	667	1114	1207	689	319	891
	runoff	167	275	134	149	35	108
	average RC	8%	12%	6%	18%	5%	10%
	annual RC	25%	25%	11%	22%	11%	12%
Catchment	runoff	171	247	320	144	27	117

A l'issue du calage nous obtenons une valeur de 0,25 pour le coefficient multiplicateur du K_s , avec des valeurs de ruissellement simulées comprises entre :

- 14 % et 24 % en année sèche (scénario sec/sec) ;
- 17 et 31 % en année humide (scénario humide/humide) ;
- 26 et 40 % en année moyenne (scénario moyen/moyen).

Le ruissellement est plus grand (en %) en année moyenne qu'en année humide car il dépend directement de l'intensité des épisodes pluvieux et moins directement du cumul annuel de pluie. Le hasard fait que les pics d'intensités sont plus forts dans notre scénario moyen que dans notre scénario humide.

Comme escompté, pour chaque type d'année, le ruissellement le plus grand est obtenu avec la modalité désherbage chimique (sol nu toute l'année) et le ruissellement le plus faible avec la modalité travail du sol (4 passages de travail du sol). Le ruissellement obtenu avec la modalité enherbement total est très proche de celui obtenu avec la modalité travail du sol.

c. Coefficient de Manning (s.m-1/3) des SU et des fossés

Le coefficient de Manning traduit la rugosité de la surface du sol sur laquelle l'eau ruisselle. En l'absence d'informations spécifiques sur le Rieutort, nous avons choisi respectivement 0,05 et 0,2 comme valeurs standard pour les parcelles et les fossés. Ce choix n'a pas d'impact important car il n'influe pas sur les quantités de pertes de pesticides et est identique pour tous les scénarios.

d. Longueur, altitude et pente des segments de fossés (RS) (m)

Nous avons constitué des entités de taille inférieure à 100 m pour limiter l'approximation sur l'altitude et la pente des fossés, qui sont estimés par des valeurs moyennes sur les segments.

e. Largeur et profondeur des fossés (m)

En l'absence de connaissance précise de ce paramètre, nous avons choisi une valeur unique pour tous les fossés du bassin versant. Nous avons calculé pour cela la largeur et la profondeur moyenne des fossés dans le bassin versant de Roujan. Nous obtenons 1,2 m pour la largeur et 0.5 m pour la profondeur.

Le paramétrage de la partie « dynamique d'évolution des états de surface fait l'objet d'une autre partie spécifique, qui a déjà été présentée dans une partie précédente du rapport.

2.5.2 Résultats

L'objectif des simulations présentées ici est de comparer les 4 stratégies normatives du projet SP3A sur le plan environnemental. Nous avons choisi les valeurs simulées de concentrations maximales annuelles et de perte cumulée annuelle de pesticide à l'exutoire du bassin versant comme indicateur de performance environnementale des stratégies. Nous présentons les valeurs moyennes, minimales et maximales inter-annuelles simulées dans le tableau 39.

Tableau 39: Valeurs simulées des concentrations maximales annuelles et des pertes cumulées en pesticides à l'exutoire du bassin du Rieutort selon les 4 stratégies normatives

Stratégie	Pression (% de la surface viticole désherbée chimiquement)	Pertes en pesticides (kg)			Taux de pesticides sortant (appli = 2kg/ha) (%)		
		moyenne	minimum	maximum	moyenne	minimum	maximum
2b	38 %	2,68	<0,0001	4,70	0,24	<0,0001	0,40
2a	34 %	2,40	<0,0001	4,34	0,24	<0,0001	0,42
1b	4 %	0,21	<0,0001	0,41	0,18	<0,0001	0,34
1a	0 %	0	0	0	0	0	0

Stratégie	Pression (% de la surface viticole désherbée chimiquement)	Concentration maximale (µg/L)			Ruissellement (mm)		
		moyenne interannuelle	minimum	maximum	moyenne	minimum	maximum
2b	38 %	2,12	0,0001	3,48	181,83	49,99	288,27
2a	34 %	2,00	<0,0001	3,35	181,67	49,98	288,07
1b	4 %	0,17	<0,0001	0,33	181,08	49,92	286,32
1a	0 %	0	0	0	180,85	49,92	286,15

2.5.2.1 Pression phytosanitaire

Nous indiquons dans ce tableau, comme indicateur de la pression phytosanitaire, la part de la surface viticole du bassin versant qui est désherbée chimiquement. Cette pression traduit les choix effectués lors de la définition des stratégies. Comme escompté, la pression est faible pour les stratégies 1 et significative pour les stratégies 2. Il faut toutefois noter que la surface viticole du bassin (1530 ha) ne représente que 39 % de la superficie du bassin, ce qui implique que la pression phytosanitaire de la stratégie 2b, qui est celle employant le plus d'herbicides, mais sur moins de la moitié de la surface viticole, n'affecte en fait que 15 % de la surface du bassin. Cela a pour implication que les variations de pression phytosanitaire entre stratégies ne concernent de fait qu'une partie minoritaire de la surface du bassin.

2.5.2.2 Volume ruisselé

On peut remarquer que le volume ruisselé est fonction de la pression phytosanitaire, bien que les différences entre stratégies soient faibles. Ces différences de ruissellement sont significatives par rapport à la précision numérique des calculs bien qu'elles paraissent peu significatives en termes de gestion du ruissellement. Elles confirment bien l'effet amplificateur du ruissellement par le désherbage chimique qui favorise des états de surface croûtés et peu infiltrants. La faiblesse numérique de l'effet amplificateur est due à trois causes. L'une est que seulement 15 % de la surface du bassin est concernée par des différences d'entretien du sol en matière de désherbage chimique. Les différences en terme de ruissellement ne peuvent donc pas être très importantes. La seconde est que la simulation de repousse d'herbe après désherbage est rapide ce qui limite dans le temps l'effet spécifique du désherbage chimique sur le ruissellement. A cet égard il sera nécessaire de vérifier si les paramètres estimés de la croissance de l'herbe ne favorisent pas une sur-estimation de la vitesse de repousse. La troisième cause est liée aux faibles différences entre stratégies en terme de nombre de travaux du sol et de dates de réalisation de ces travaux simulées par Dhivine.

Par ailleurs, on notera les différences inter annuelles importantes de ruissellement, qui représentent l'écart naturel entre années sèches et années humides. On peut ajouter (non visible dans le tableau) que ce n'est pas l'année humide/humide qui présente le ruissellement le plus important mais l'année moyenne/humide en raison d'évènements pluvieux plus intenses en année moyenne/humide qu'en année humide/humide, dans le cas de la série de climats retenus.

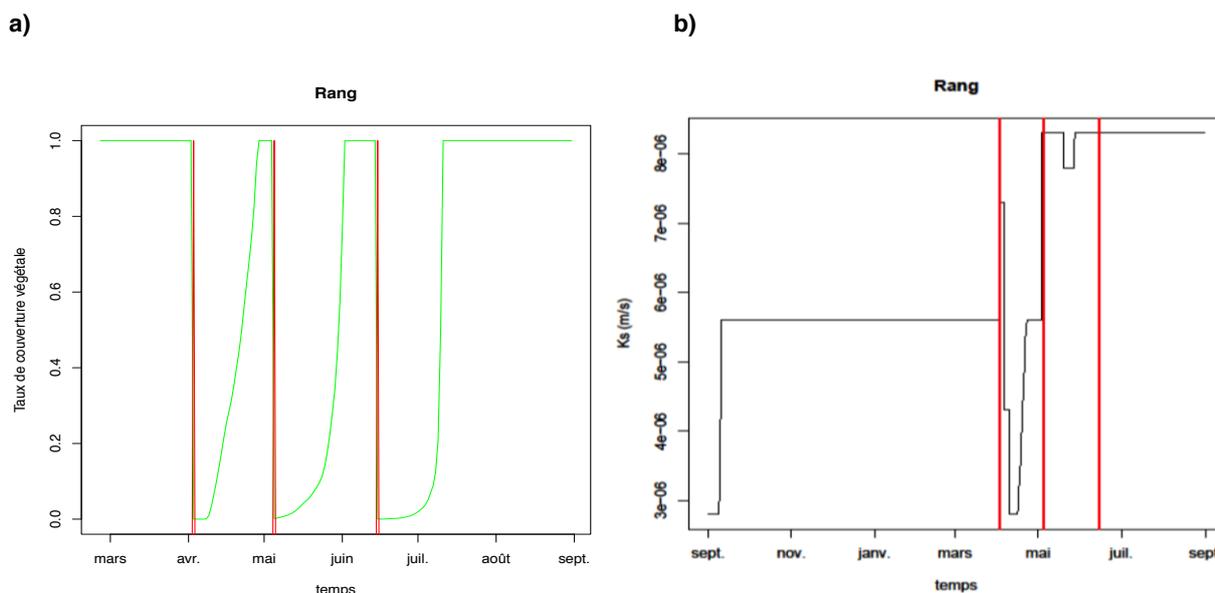


Figure 47: Exemple d'évolutions simulées a) de la couverture végétale (en vert) et b) de la conductivité hydraulique du sol (en noir) sous le rang pour une parcelle simulée subissant 3 labours (traits rouges).

La Figure 47 illustre, à titre d'exemple, le type de dynamiques simulées d'évolution des propriétés de conductivité hydraulique de l'horizon de surface d'un sol viticole sous l'influence du travail du sol et du développement du couvert d'adventices. Au sortir de l'hiver, la conductivité est moyenne et correspond à celle d'un sol non labouré mais présentant une couverture herbacée supérieure à 50 % de sa surface (EdS VCst). Dès le premier travail du sol la conductivité est maximisée (EdS T) mais sur quelques jours seulement en raison de pluies qui provoquent la formation d'un encroustement du sol (EdS TCst). On observe aussi que le travail du sol détruit l'enherbement, mais que celui-ci se redéveloppe rapidement après le labour, ce qui a un effet positif sur la conductivité du sol au bout d'une à deux semaines, corrigeant ainsi l'effet négatif des pluies venant fermer la porosité créée par le labour. Lors du deuxième labour, la conductivité est à nouveau maximisée, mais cette fois elle ne diminue que faiblement et transitoirement en raison d'une pluviosité faible. On voit donc bien sur cet exemple, comment la modélisation proposée représente les effets croisés du labour, de la pluie et du développement de la végétation herbacée spontanée sur les propriétés d'infiltrabilité du sol.

2.5.2.3 Pertes et concentrations en pesticides à l'exutoire du bassin versant

Les pertes et concentrations simulées sont bien sûr nulles pour la stratégie 1a qui interdit tout désherbage chimique. Elles sont significatives pour la stratégie 1b, bien qu'elle n'admette du désherbage chimique que sur des situations parcellaires restrictives, soit 4 % de la surface viticole c'est à dire 1,6 % de la surface totale du bassin. Ce résultat illustre le fait qu'une contamination significative des eaux, supérieure à la norme de qualité de l'eau potable (> 0,1 µg/L), peut apparaître avec de faibles surfaces de vigne désherbées chimiquement. Les stratégies 2 montrent des niveaux de contamination supérieurs, correspondant à une différence d'un ordre de grandeur tant en concentrations qu'en pertes cumulées avec la stratégie 1b. Les différences relatives entre les stratégies 2a et 2b sont faibles et suggèrent qu'une souplesse peut être autorisée (stratégie 2b) sans conséquence majeure sur le niveau de contamination. On remarque aussi la forte variabilité inter-annuelle des pertes et concentrations. La perte cumulée annuelle minimale est très faible en raison d'un scénario climatique sec qui n'engendre qu'un seul évènement ruisselant polluant de faible importance. De surcroît cet unique évènement ruisselant de l'année sèche se produit longtemps après l'application des herbicides, à la fin de l'été, ce qui a permis la dégradation d'une partie des herbicides et ne produit donc qu'une très faible concentration dans l'eau de ruissellement.

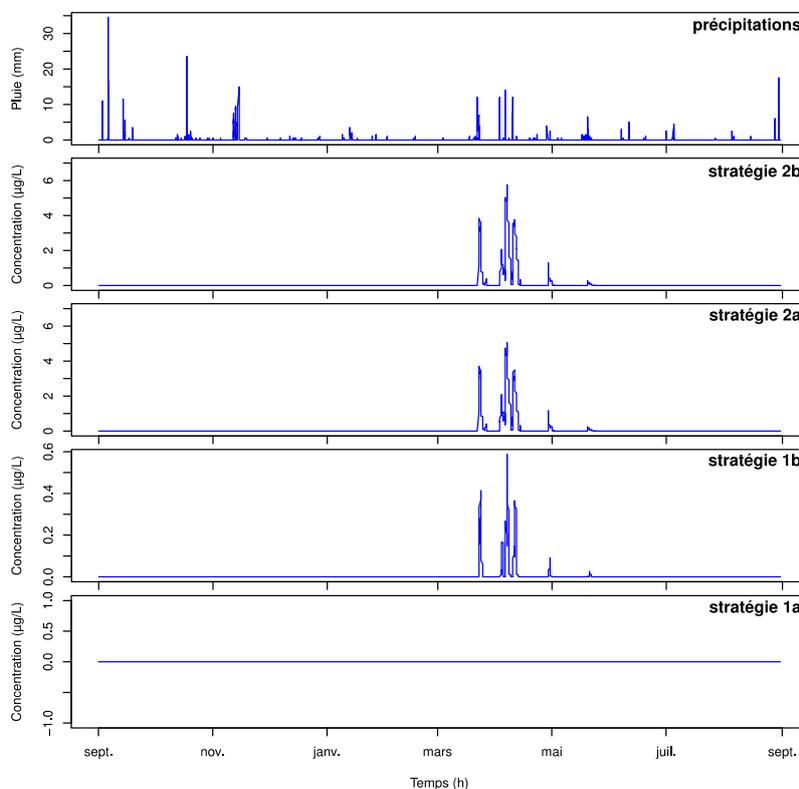


Figure 48: Exemple d'évolutions simulées durant une année des concentrations en herbicide à l'exutoire du bassin du Rieutort pour les 4 stratégies normatives testées.

La Figure 48 illustre l'évolution de la contamination des eaux sur une année pour les différentes stratégies normatives. La contamination des eaux est très localisée dans le temps. Elle intervient sur une période qui suit de près la période d'épandage et présente de manière concomitante des pluies fortes et de fortes teneurs en herbicides des sols traités dans la mesure où les processus de dégradation n'ont pas encore eu d'effet majeur sur le stock de pesticides du sol. La simulation illustre le caractère très discontinu dans le temps du phénomène de contamination des eaux de surface et donc la difficulté d'en avoir une estimation précise par les réseaux de surveillance standard, reposant sur des prélèvements réguliers mais non resitués par rapports aux évènements hydrologiques. On observe enfin que la contamination simulée se produit à la même période pour les 3 stratégies autorisant l'emploi d'herbicides, puisque pluviométrie et périodes d'application sont identiques entre stratégies, mais que les niveaux de contamination sont bien évidemment différents.

2.5.3 Synthèse et discussion

Les résultats obtenus confirment l'effet d'ordre 1 de l'intensité de la pression phytosanitaire sur l'intensité de contamination des eaux. Ce résultat attendu, mais très délicat à démontrer par des observations in situ en raison de la méconnaissance très fréquente des pratiques de traitement à l'échelle des bassins versants, est quantifié ici par l'approche de modélisation. Il indique la pertinence de rechercher prioritairement des stratégies économes en herbicides pour l'entretien des sols. A cet égard on peut également noter que ce sont les stratégies évitant de manière généralisée l'emploi d'herbicides qui sont les seules viables à terme en matière de respect de la qualité des ressources en eau. En effet, même la stratégie 1b, qui n'autorise de fait des traitements que sur moins de 2 % de la surface du bassin, produit des niveaux significatifs de contamination à l'exutoire du bassin. Les concentrations simulées sont a priori de l'ordre de grandeur des concentrations communément mesurées dans les réseaux de l'agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse. Une comparaison directe est impossible en l'absence d'informations sur les bassins d'alimentation des points du réseau de surveillance des eaux.

La forte variabilité inter-annuelle des contaminations simulées confirme la nécessité de comparer des stratégies sur un ensemble d'années et indique les biais potentiels d'expérimentations de courte durée pour sélectionner des stratégies d'entretien du sol plus préservatrice des ressources en eau.

La modélisation développée, bien que complexe, présente de nombreuses limites, qu'il convient d'avoir à l'esprit lors de l'interprétation des résultats. Trois limites majeures peuvent être citées :

- **La faiblesse des informations sur le comportement des sols** du bassin du Rieutort qui nous a conduit à extrapoler des données acquises sur un autre secteur de la plaine languedocienne, le bassin versant de Roujan (ORE OMERE). Pourtant le bassin du Rieutort bénéficie d'une cartographie des sols à l'échelle du 1/100 000^{ème}, qui est plus précise que celle disponible en général en France à l'échelle du 1/250 000^{ème}. Ainsi, malgré les efforts conséquents faits par la communauté du sol ces dernières années, la question de l'acquisition d'une connaissance spatialisée des sols et de leurs propriétés à une résolution spatiale suffisante reste posée dans le cadre d'une application environnementale telle que celle développée ici.
- **Le caractère encore frustrant de la modélisation du développement de la végétation herbacée spontanée**, qui n'intègre pas les effets négatifs de la sécheresse à ce stade. De ce fait, la modélisation surestime sans doute le degré de couverture des sols par les adventices au cours de l'année, ce qui revient à minimiser quelque peu les flux de ruissellement à l'échelle parcellaire.
- **L'absence de prise en compte des échanges surface-souterrain, notamment dans le réseau hydrographique**, en raison d'une méconnaissance des domaines aquifères du Rieutort et de leurs connexions avec la surface. La conséquence en est une dynamique modifiée des débits à l'exutoire du bassin, avec une maximisation des crues qui suivent les périodes sèches puisqu'aucune réinfiltration n'intervient dans le réseau et une sous-estimation des débits entre crues puisqu'aucun débit de base n'est simulé.

Toutefois, les ordres de grandeurs des débits et concentrations en pesticides simulés sont cohérents avec les ordres de grandeurs des valeurs observées sur les sites expérimentaux situés dans des conditions climatiques, agronomiques et pédologiques proches.

Le bassin versant du Rieutort a été choisi essentiellement du fait de l'existence d'une forte demande locale (cave coopérative, agriculteurs...) concernant l'identification de modalités d'entretien du sol permettant d'aboutir à la réduction des risques de ruissellement polluant. Il présente toutefois la particularité de n'être pas équipé, notamment à son exutoire, d'une station de mesures et de prélèvements d'échantillons permettant de suivre et d'analyser les concentrations en pesticides dans les eaux. Une évaluation du modèle sur des données de contaminations observées n'était donc pas possible. Elle aurait été difficile de toutes manières, même en disposant de données de contamination, car pour être pertinente, elle aurait exigé une bonne connaissance des utilisations de pesticides sur l'ensemble du bassin Rieutort durant toute la période d'évaluation. Or en milieu viticole languedocien l'enregistrement systématique des pratiques phytosanitaires est très rare.

Une évaluation approfondie de la modélisation n'est en fait possible que sur des sites observatoires où on dispose de chroniques d'utilisation des pesticides et de contamination des eaux détaillées. Du fait de la difficulté d'obtention de ces données, ces sites sont de tailles plus réduites que le bassin du Rieutort. Ainsi, antérieurement au projet SP3A, nous avons mené une évaluation de la modélisation (Bouvet et al., 2011) sur le bassin versant de Roujan de 91 ha, faisant parti de l'Observatoire de Recherche en Environnement OMERE) et sur lequel les pratiques et la contamination de l'eau sont suivis depuis près de 20 ans. Du fait de la proximité de situation agro-pédo-climatique entre cet observatoire et le Rieutort, nous avons fait l'hypothèse que la modélisation employée était également valide pour une application sur le Rieutort. Notons par ailleurs que l'objectif des simulations menées dans le projet était de comparer le bénéfice environnemental apporté par plusieurs stratégies de réduction d'utilisation des pesticides et non de simuler le niveau absolu de contamination induit par chaque stratégie.

Le temps imparti au programme n'était pas compatible avec une étude concernant la transposition des résultats à d'autres contextes pédo-climatiques. Il nous faut signaler que les modèles relatifs au transfert de pesticides à l'échelle du bassin versant, développés et utilisés dans ce programme SP3A, sont particulièrement adaptés à des bassins versants où le ruissellement est prépondérant. Un travail de transposition à des contextes où le transfert des pesticides serait influencé de manière significative par d'autres voies telles que la percolation dans les sols et concernerait la contamination de masses d'eaux profondes nécessitera des développements complémentaires en termes de modélisation hydrologique. Ils sont en cours au sein de l'UMR LISAH.

Au-delà de l'analyse des stratégies normatives envisagées dans ce projet, le résultat majeur de cette partie est la construction d'un modèle biophysique, complexe mais opérationnel, qui ouvre de nombreuses possibilités. Il doit certes encore être amélioré, voir limites ci-dessus, mais d'ores et déjà il permet de tester l'effet de choix techniques à l'échelle du bassin versant sur le transfert de pesticides vers l'exutoire, par ruissellement de surface. Son couplage avec le modèle de décision Dhivine permet aussi d'évaluer à présent, dans le cas de bassins viticoles, des stratégies d'entretien du sol à l'échelle des exploitations d'un bassin. Ceci autorise le test de l'impact d'itinéraires techniques adaptatifs aux conditions d'exploitation variables i) spatialement en fonction des contraintes de sol, ii) temporellement en fonction des contraintes climatiques et iii) spatio-temporellement en fonction des moyens humains et techniques des exploitations.

3 Acceptabilité des stratégies candidates

3.1 Evolutions envisagées par les viticulteurs

3.1.1 Méthodes

Pour tester l'acceptabilité par les agriculteurs de nos stratégies candidates d'entretien des sols viticoles, deux méthodes différentes ont été testées.

- Méthode A: on présente les différentes stratégies aux agriculteurs. Ils réagissent et leurs avis et perceptions sont recueillis, en se centrant sur la question de la faisabilité (mise en œuvre concrète).

- Méthode B : au cours des entretiens conduits pour recueillir l'état actuel des pratiques, leurs évolutions récentes et la nature des réseaux, on rajoute des questions sur les perspectives de l'agriculteur sur ses projets et vision de l'avenir en matière d'orientations générales de l'exploitation agricole et de pratiques d'entretien du sol. On l'encourage ainsi à forger un scénario. Selon la littérature, il s'agit là de répondre à une question du type "que va t-il se passer ?" ou "que peut-il se passer ?", ou « quel avenir voyez vous ? » ; il s'agit de bâtir des scénarios exploratoires. Cela fournit des indications qui sont ensuite transformées en hypothèses interprétatives quant à la volonté et la possibilité (ou non) pour les agriculteurs de s'orienter vers certaines de nos stratégies candidates.

C'est finalement la méthode B qui fut adoptée, ceci pour plusieurs raisons (i) La méthode A obligeait à positionner rapidement l'agriculteur dans une « typologie » de pratiques afin d'être en mesure de lui

soumettre des stratégies candidates qui soient plus vertueuses que ses pratiques actuelles, il fallait donc rapidement et en direct opérer un diagnostic pour pouvoir enchaîner l'entretien (il n'était pas question d'importuner deux fois la même personne) (ii) les stratégies candidates se sont avérées mal adaptées aux situations vécues par les agriculteurs et (iii) les stratégies candidates pouvaient être comprises par les agriculteurs comme de possibles futures mesures agro-environnementales gouvernementales, ce qui ne manquait pas de créer de la suspicion fortement dommageable pour le travail à effectuer.

Finalement donc l'option B fut retenue, même si elle présente un certain niveau d'incertitude quant aux interprétations que nous avons tiré des réponses des agriculteurs. Au total 23 agriculteurs (deuxième vague d'entretiens) furent questionnés.

3.1.2 Résultats

Nous abordons la question de l'acceptabilité d'abord sous l'angle individuel, puis sous l'angle collectif. Pour aborder la question de l'acceptabilité, ce sont 23 agriculteurs qui purent être interrogés sur leurs perspectives d'évolution. Ce nombre réduit par rapport aux 31 agriculteurs enquêtés au total s'explique (i) par le fait que nous avons supprimé les viticulteurs biologiques puisque ayant déjà « acceptés » les pratiques sans herbicides et (ii) un petit nombre (trois) n'a pas souhaité ou pu être interrogé de nouveau. Il convient également de rappeler que les MAE établis à partir de 1999 dans la zone d'étude ont provoqué un changement des pratiques des viticulteurs ; auparavant beaucoup d'entre eux désherbaient intégralement de manière chimique l'intégralité de leur vignoble ; aujourd'hui le désherbage chimique de l'inter-rang est l'exception. L'étape suivante, celle qui est en jeu aujourd'hui est donc l'abandon du désherbage chimique sous le rang.

3.1.2.1 Indicateurs de propension des agriculteurs à modifier les pratiques d'entretien des sols

Nos entretiens ont permis de rassembler 8 indicateurs principaux qui semblent influencer la capacité de changement des pratiques d'entretien des sols dans le bassin versant du Rieutort. Certains agriculteurs peuvent cumuler des valeurs favorables (ou défavorables) pour plusieurs indicateurs. Enfin certains indicateurs mériteraient d'être complétés par des variables supplémentaires.

- Indicateur n°1: exploitation agricole partiellement ou totalement en AB (actuellement 4 agriculteurs sur 23 enquêtés). A condition de s'informer sur l'ancienneté de la conversion, les motivations, la surface concernée et les résultats actuels, cette labellisation est indicatrice d'une position et d'un engagement vers des pratiques d'entretien du sol sans usage d'herbicides. Dans une moindre mesure on pourra prendre en considération une labellisation de type agriculture-raisonnée, à condition ici plus qu'ailleurs d'en explorer les contenus et motivations.

- Indicateur n°2: souscription de mesures agro-environnementales « réduction ou abandon des herbicides » (10/23). Il convient cependant d'interroger l'agriculteur sur le bilan qu'il tire de cette expérience (voir plus bas).

- Indicateur n°3: achat d'un outil intercep (7 /23) ; lorsque les agriculteurs ont acheté un outil intercep (en privé ou en CUMA) pour travailler mécaniquement sous les rangs de vignes, cela signifie une volonté de se diriger vers une réduction de l'usage des herbicides voire leur abandon total sur une partie ou la totalité de l'exploitation.

- Indicateur n°4: (présence d') enherbements temporaires naturels ou d'enherbements permanents (3/23); cela indique une absence d'opposition à la présence d'herbes dans les vignes, au moins pendant la période hivernale. Il convient toutefois d'analyser le comportement par rapport à l'enherbement d'été et d'examiner la surface concernée.

- Indicateur n°5: surface à labourer en rapport à la main d'œuvre disponible (4/23 sont concernées par un ratio désavantageux); ce ratio indique une forte propension à conserver des pratiques de désherbage chimique par souci d'économiser du temps de travail.

- Indicateur n°6: irrigation de la vigne en production (6/23); l'installation d'un système de goutte à goutte pour arroser la vigne en production est susceptible de freiner l'usage de l'outil intercep (sauf à installer les arroseurs en hauteur) ; par ailleurs l'irrigation favorise la pousse de l'herbe. .

- Indicateur n°7: (présence de) vignes non ou difficilement mécanisables (et proportion de la surface totale) (7/23); cela peut concerner des vignes en pente ou fortement empierrées ou encore les vignes à inter-rangs étroits ou non palissées. Dans ces vignes les herbicides peuvent être appliqués par des machines portées à dos d'hommes.

- Indicateur n°8: fin de carrière (2/23); ces agriculteurs proches de la retraite (parfois sans reprise) sont peu susceptibles de faire évoluer leurs pratiques ou d'investir dans de nouveaux équipements.

Au delà de ces indicateurs principaux aisé à renseigner il faut mentionner quelques facteurs supplémentaires qui viennent moduler la signification des indicateurs précédents ou tout du moins à indiquer dans quel sens les enrichir.

Quatre agriculteurs ayant souscrit des MAE n'ont pas l'intention de renouveler. La raison principale est la nécessité de procéder à des désherbages manuels (à la pioche) en été afin de "corriger" les défauts dans l'usage des outils intercep. Plus généralement, ces agriculteurs souhaiteraient plus de flexibilité entre parcelles et entre années pour adapter les pratiques aux situations. L'idéal pour eux seraient de pouvoir combiner dans le temps (et selon le climat, donc pas obligatoirement chaque année) le désherbage à l'intercep et un herbicide de post-levée. Parmi ces agriculteurs, la difficulté d'utiliser l'intercep dans les vignes à inter-rangs étroits, en pente ou caillouteuses est également évoquée.

Le lien entre le choix de pratiques et le prix de vente du vin est évoqué (fortement chez 3/23), notamment quand les viticulteurs sont coopérateurs. En cave coopérative, ils doivent produire un maximum de raisins et dans ce cas la concurrence avec les adventices est moins bien supportée. Pour ceux-ci, seule une interdiction d'usage ou une forte augmentation des prix des intrants pourraient les contraindre à modifier leurs pratiques. A contrario les agriculteurs vinifiant eux-mêmes leur production font état de la nécessité de faire évoluer leurs pratiques vers plus de durabilité pour des questions d'image vis-à-vis de leur clientèle. Cela milite pour ajouter un indicateur qui prendrait en compte le devenir de la vendange (cave coopérative ou cave particulière) et l'objectif de rendement.

3.1.2.2 Les logiques de changement au niveau individuel

Quatre agriculteurs en AB mettent déjà en pratique la stratégie 1a.

Ceux qui utilisent déjà peu d'herbicides (groupe 2 de la typologie : agriculteurs équipés d'intercep et ayant ou non souscrit des MAE) sont des candidats potentiels pour mettre en œuvre la stratégie 1.a ou 1.b. Cependant, la majorité n'a pas l'intention de passer au 0 herbicide (stratégies 1a ou 1b), ni pour certains de souscrire à nouveau des MAE ; en effet ils veulent avant tout gagner en flexibilité spatiale et annuelle et ne peuvent donc adhérer qu'à notre stratégie 2.a (ou 2.b) : cela correspond au souhait de combiner partout ou presque travail du sol – à l'intercep - et 1 post levée sur le rang pour éviter le travail manuel de rattrapage. Pour plus d'adhésion encore, il conviendrait de permettre un second désherbage de post levée sur taches.

Ceux du groupe 3 (les « standards ») qui prévoient d'acheter un outil intercep voudraient l'utiliser en se gardant le même type de flexibilité, avec parfois aussi la possibilité de faire deux passages d'herbicides sur les parcelles à problèmes (donc plutôt une stratégie de type 2b mais sans assurance de la limite de 10 %). Chez ces agriculteurs, la présence d'un système d'irrigation amène les viticulteurs à faire au moins deux passages d'herbicides partout où celui-ci est présent.

Dans le groupe 4, des comportements variés sont possibles en fonction de la contrainte surface/temps de travail et des possibilités financières d'investissement (c'est ici que l'on rencontre les plus grosses exploitations). Lorsque la contrainte temps de travail peut être relâchée et que la personne n'est pas proche de la retraite, les moyens financiers peuvent autoriser le changement direct vers la stratégie 1.a. ou 1.b, ce que confirment les viticulteurs.

Un nombre encore important (7/23) de viticulteurs sont limités par l'absence d'équipement intercep (ils sont dans les groupes 3 et 4). Donc peu de perspective d'évolution s'offre à eux, pour le moment.

Pour « satisfaire » les agriculteurs, Il manque une stratégie candidate qui serait 0 herbicide et deux passages possibles d'herbicides sur les parcelles à problèmes. Ces stratégies très contrastées intéressent particulièrement les agriculteurs du groupe 4.

3.1.2.3 Les logiques collectives de changement

Nous venons de voir que la typologie des pratiques d'entretien du sol n'a qu'un faible impact sur la propension d'un viticulteur à adopter les modalités d'entretien du sol proposées par les experts pour chacune des stratégies candidates de réduction des herbicides. Regardons maintenant l'influence de la position des viticulteurs dans le réseau avec leur possibilité à changer de pratiques. Certaines informations peuvent être apportées sur la manière dont les dynamiques s'opèrent au sein du réseau.

Plusieurs viticulteurs nous ont indiqué que la gestion de mauvaises herbes et l'entretien du sol se discutent moins que d'autres aspects de la viticulture, notamment moins que les traitements phytosanitaires. Certains enquêtés disent que l'entretien du sol se discute plutôt au sein de l'exploitation (entre régisseur et tractoriste, entre exploitant et salarié, ...); d'autres soulignent que l'entretien du sol est quelque chose qu'ils maîtrisent bien, et qu'ils n'ont pas besoin de discuter avec des collègues. R13 : « On discute ce qu'on traite, s'il traite toujours avec le même produit, que sont les doses. Chaque combien ils passent, doucement ou souvent ».

En même temps, on observe que ces pratiques d'entretien du sol sont réellement en cours d'évolution et qu'elles sont donc discutées et font l'objet de réflexions. Les enquêtés se montrent bien au courant des pratiques de leurs collègues (« lui il a un intercep... lui il a acheté des disques »). Bien qu'il n'y ait pas de prêt d'intercep, ceux de girobroyeur et de disques se font. Il se peut que, les pratiques d'entretien du sol étant plus visibles que les traitements phytosanitaires, il soit moins nécessaire de poser des questions pour s'informer sur les pratiques et les décisions des autres. Il est possible aussi que dans l'entretien du sol, l'on soit moins jugé qu'on ne le craint. Deux ou trois fois, un viticulteur a exprimé son impression d'être mal jugé par ses pairs; alors que d'autres enquêtés se montraient prêts à pointer le bon travail de leurs voisins. R11 raconte : « J'ai vu les vignes où ils ont passé l'intercep, et c'est tout nickel. Sur le chemin là, il y a [R13], lui, ses vignes où il passe l'intercep, c'est nickel ». R8 pointe R1 comme quelqu'un en avance : « Il fait le labour au chenillard ».

On a vu comment la réduction d'usage d'herbicides et l'adoption de l'intercep s'opèrent sur le bassin par des moyens différents. Deux exploitants en agriculture biologique n'ont jamais utilisé d'herbicide, alors que deux autres se sont convertis récemment à ce mode de production. Parmi les 3 exploitants qui n'utilisent plus d'herbicides sur la grande majorité de leur surface, il y en deux (en cave privée) qui semblent motivés par la satisfaction professionnelle que cela leur procure et l'image que cela leur permet de projeter sur le marché des vins. Un autre (en cave coopérative) est plutôt motivé par la conviction que les herbicides risquent d'être interdits tôt ou tard et l'envie de profiter des aides financières actuelles. Les viticulteurs en « désherbage standard » et même en « désherbage fort » commencent à s'équiper avec des interceps et à les utiliser sans toujours se servir des aides financières ou des opportunités de marché qui peuvent récompenser ces efforts. De plus, on constate que certaines démarches sont « individuelles », et d'autres collectives, au sein des CUMA.

Par ailleurs, bien que les viticulteurs disent en général que l'entretien du sol « ne se discute pas trop » entre collègues, ni fait partie des sujets ou on fait appel aux techniciens, ils sont visiblement en train de formaliser sur le BV des points de vue sur les possibilités techniques et les moyens pratiques pour réduire l'usage des herbicides et passer à une gestion mécanique de la végétation spontanée. Plusieurs personnes ont fait état d'une « journée de démonstration » qui a eu lieu il y a 2 ou 3 ans, au domaine de R6, où tous les fabricants des interceps sont venus montrer leurs modèles. Selon R5, il y avait « plus de 20 constructeurs différents, un tracteur par rangée. La meilleure était la marque xxx ». C'est elle qui a été choisie par la CUMA à Causses et un vigneron a construit sa propre machine.

Même si l'identification de l'influence du réseau vers l'une ou l'autre stratégie est faible quelques cas particuliers ont été observés.

- R15 qui forme une clique avec 3 viticulteurs en agriculture biologique est enclin à adopter les pratiques associées à la stratégie 1.a 'zéro herbicide'. On peut supposer que sa position dans le réseau influence ses pratiques d'entretien du sol, le poussant à aller vers des pratiques plus 'bio'.
- R21 qui est vu par les autres viticulteurs comme un 'innovateur' est le seul dans le cœur du réseau à pouvoir adopter les pratiques associées à la stratégie 1a. R19, R24 et R25 qui forment une triade, sont positionnés au même niveau dans le réseau, ce qui peut les influencer à vouloir adopter les mêmes pratiques (intercep + 1 herbicide post levée).
- R27 et L9 sont tous les deux situés dans la seconde périphérie du réseau, loin du cœur du réseau, ils sont intégrés dans une triade avec Lne10. Ils peuvent tous les trois adopter les modalités d'entretien du sol de la stratégie 2.b.
- R22 et R23 sont tous les deux identifiés comme n'étant pas disposés à changer des pratiques d'entretien du sol, sont bien intégrés dans le cœur du réseau.

Synthèse et conclusion générale

La réduction des risques de ruissellement polluant est un enjeu particulièrement important en région viticole méditerranéenne du fait des risques élevés de contamination des eaux liés à l'importance des écoulements de surface et aux usages importants de pesticides. L'enjeu est particulièrement important pour les herbicides qui sont les principales molécules retrouvées dans les eaux. Parallèlement à une réduction de ces usages, une des voies possibles permettant cette réduction est le maintien ou la restauration de la fonction du sol de régulation des flux d'eau et de pesticides. Cette fonction, liée à un coefficient d'infiltrabilité du sol élevé, assure au sol un rôle de tampon par rapport aux crues, à l'érosion et, potentiellement, au transfert de pesticides. De nombreux travaux ont montré que le coefficient d'infiltrabilité du sol est sous la dépendance des états de surface du sol et, qu'en zone viticole les états de surface et leurs évolutions dépendent des pratiques d'entretien du sol en interaction avec le climat. Réduire les risques de ruissellement polluant dans un bassin versant viticole passe donc notamment par l'identification de modalités d'entretien du sol et de distributions spatiales de ces modalités qui participent à la préservation ou restauration de l'infiltrabilité du sol tout au long de l'année tout en réduisant les usages d'herbicide. Ces modalités doivent cependant être potentiellement acceptables par les viticulteurs.

Dans ce contexte, le projet s'est fixé comme objectif d'identifier et d'évaluer, en viticulture méridionale, des modalités d'entretien du sol et des répartitions spatiales de ces modalités permettant réduire à l'échelle du bassin versant la contamination des eaux de ruissellement par les herbicides, tout en étant économiquement, techniquement et socialement acceptables par les viticulteurs. Pour atteindre cet objectif, le projet s'est appuyé i) sur l'élaboration d'une démarche d'identification à dire d'experts de stratégies candidates de réduction des herbicides à l'échelle du bassin et ii) d'évaluation de ces stratégies à l'aide de modèles et à dire de viticulteurs (Figure 1). Pour permettre cette démarche, certains des modèles nécessaires à l'évaluation ont été développés au cours du projet.

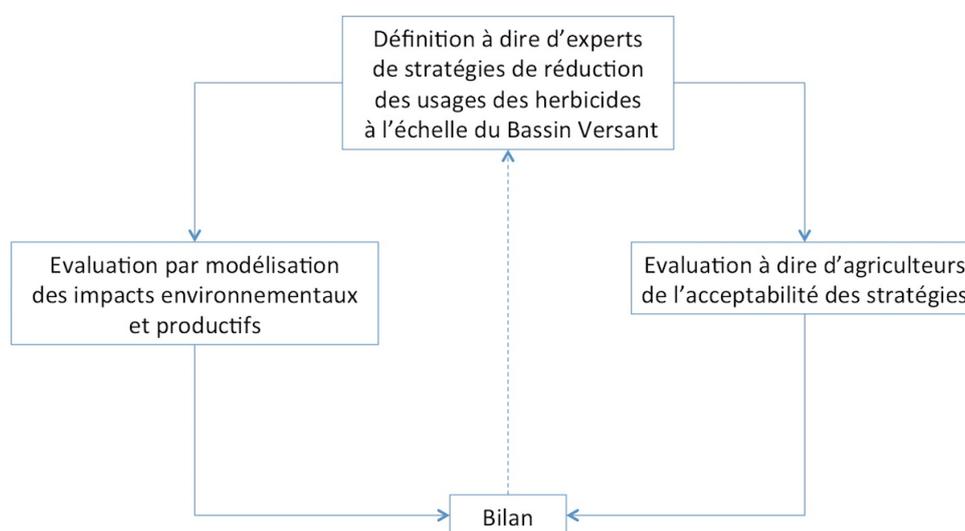


Figure 1 : Démarche générale

Le bassin viticole choisi pour le développement et la mise en œuvre de la démarche est le bassin du Rieutort. Localisé en grande partie dans la plaine viticole héraultaise, en bordure des premiers contreforts du massif central, ce bassin s'étend sur 45 km², dont 15,4 km² sont consacrés à la culture de la vigne. Le bassin versant n'est pas instrumenté pour suivre et mesurer les écoulements dans le réseau hydrographique. Il fait partie du bassin d'alimentation d'une aire de captage d'Alimentation en Eau Potable (AEP). Du fait de la présence répétée de pesticides dans les eaux, ce captage a été classé « captage grenelle » dans la liste des captages les plus menacés par les pollutions diffuses (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie).

1 Les stratégies candidates et leurs déclinaisons en modalités d'entretien du sol spatialement réparties au sein du bassin versant

A l'issue d'un processus de concertation entre différents types de partenaires du projet (chercheurs, animateurs de bassins, conseillers agricoles), complété par un travail d'enquêtes et entretiens individuels auprès d'agriculteurs (Chavassieux, 2013), deux stratégies principales de réduction des herbicides ont été ciblées (Tableau 1). Elles sont basées sur une réduction drastique, par rapport à la moyenne régionale (valeur 0,9 selon Mezière *et al.* (2009)), de l'indice de fréquence de traitement (IFT) herbicide : une stratégie 1a ou « zéro herbicide » et une stratégie 2a visant respectivement un IFT de 0 et de 0,3 aux échelles de la parcelle et du bassin versant. La première stratégie interdit l'emploi de tout herbicide ; la deuxième n'autorise l'emploi d'herbicide que sur un tiers de la superficie de la parcelle, c'est-à-dire sous les rangs de vigne, et ce, à raison d'un seul passage d'herbicide de post-levée. Pour introduire de la souplesse dans les exploitations viticoles une variante à chacune des stratégies a été proposée donnant à chaque exploitation la possibilité d'augmenter son IFT moyen de 0,1. Ces variantes (stratégies 1b et 2b) autorisent l'utilisation d'un herbicide de post-levée sur la totalité de la parcelle dans des parcelles « à problèmes » sous réserve que la superficie totale concernée ne dépasse pas 10 % de la superficie en vigne de l'exploitation. Dans le cadre du projet, les seules parcelles concernées par cette souplesse ont été les parcelles aux inter-rangs très étroits (<= 1,6 m) qui ne peuvent pas être désherbées mécaniquement et sont facilement repérables sur des images satellites.

Tableau 1 : Les stratégies candidates retenues

Stratégie	Objectif IFT annuel à l'échelle du BV	Usages d'herbicides associés
1a	0	0 herbicide sur le rang (R) et inter-rang (IR)
1b	≤ 0,1	Idem stratégie 1a avec autorisation d'un désherbage de post-levée intégral sur parcelles très contraintes (maxi 10 % de la superficie en vigne du BV)
2a	≤ 0,3	Autorisation d'un désherbage de post-levée sur 1/3 de la superficie de la parcelle (≈ sur le R)
2b	0,3 – 0,4	Idem stratégie 2a avec autorisation d'un désherbage de post-levée intégral sur parcelles très contraintes (maxi 10 % de la superficie en vigne du BV)

Afin de favoriser le maintien d'états de surface du sol le plus infiltrant possible, les modalités d'entretien du sol qui ont été retenues pour chaque stratégie sont basées sur des combinaisons variées au sein de la parcelle d'enherbement naturel permanent, d'enherbement naturel hivernal, de travail de printemps-été, et, lorsqu'autorisé par la stratégie, de désherbage chimique de fin d'hiver. Hormis pour les vignes étroites, considérées soit comme étant arrachées, soit comme entretenues par désherbage chimique intégral, les modalités retenues ont été réparties entre les parcelles en vigne du bassin versant en prenant en compte une cartographie des risques de stress hydrique liés à leur mise en œuvre. La spatialisation des risques de stress hydrique dans le bassin versant du Rieutort a été réalisée au cours d'une étude préliminaire. Elle a mobilisé un modèle de bilan hydrique (WaLIS, Celette *et al.*, 2010) pour évaluer les jours de stress hydrique subis par la vigne selon les différentes combinaisons de types de sols du bassin versant et de modalités d'entretien des sols. Finalement, pour chaque stratégie, parmi les différentes modalités d'entretien du sol jugées acceptables pour une parcelle, celle permettant de maintenir un enherbement le plus longtemps possible et sur la plus grande surface possible de la parcelle, a été sélectionnée. Une carte de la distribution spatiale des modalités d'entretien du sol associées a ainsi été générée pour chaque stratégie candidate.

2 L'évaluation par modélisation

2.1 Une chaîne de modèles pour évaluer les impacts productifs et environnementaux des stratégies

Pour chacune des stratégies candidates, l'évaluation des impacts productifs et environnementaux de la distribution spatiale des modalités d'entretien du sol associées a été réalisée à l'aide des chaînes de modèles schématisées ci-dessous (Figure 16, Partie 3) et mises en œuvre sur neuf climats types jugés représentatifs de la variabilité climatique du bassin.

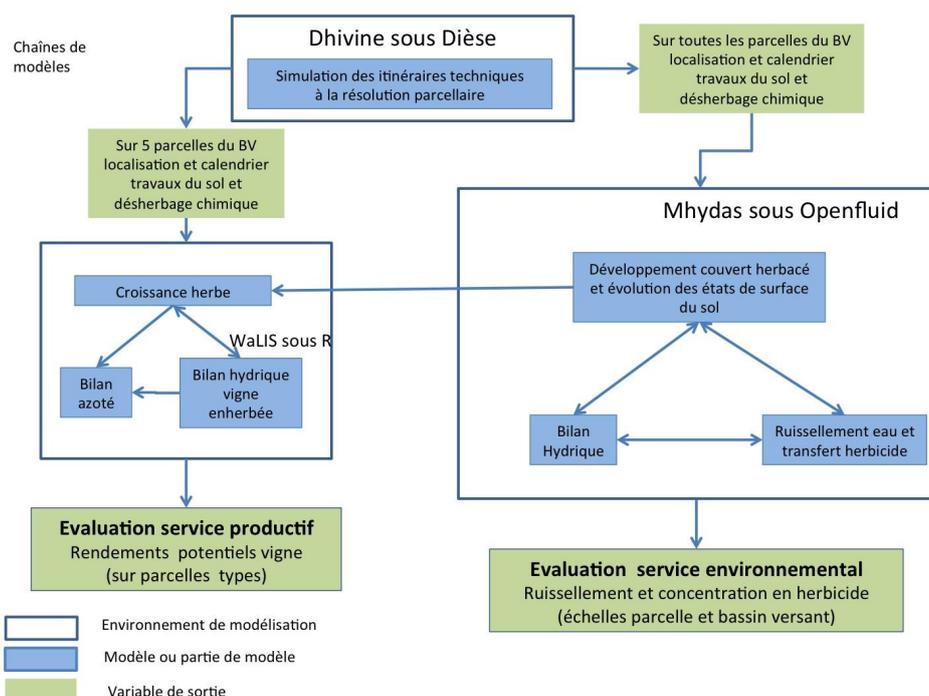


Figure 16 : schéma général décrivant les chaînes de modèles utilisés pour l'évaluation des stratégies candidates

Les itinéraires techniques résultant pour chaque climat type de la modalité d'entretien du sol affectée à chaque parcelle du bassin ont été simulés à l'aide d'un modèle de décision (le modèle Dhivine). Ces itinéraires techniques simulés, ont servi de données d'entrée aux modèles biophysiques visant, soit à simuler les bilans hydriques et azotés à l'échelle de la parcelle pour en évaluer l'impact sur le rendement, soit à simuler les flux de ruissellement polluant aux échelles de la parcelle et du bassin versant pour en évaluer l'impact sur la qualité de la ressource en eau. Ces modèles incluent une modélisation de l'évolution des états de surface du sol et/ou du couvert végétal sous l'effet des itinéraires techniques et du climat.

2.1.1 Un modèle pour simuler les itinéraires technique dans chacune des parcelles en vigne du bassin

La simulation des itinéraires techniques d'entretien du sol a été réalisée à l'aide du modèle Dhivine. Ce modèle a été construit à partir d'une connaissance sur la conduite du vignoble dans la plaine viticole héraultaise, issue d'enquêtes auprès d'un échantillon de 54 viticulteurs (Paré, 2011). Il permet de simuler, pour chacune des parcelles en vigne d'un ensemble d'exploitations viticoles, la succession temporelle de toutes les opérations techniques nécessaires à la conduite de la vigne sur un cycle cultural ou, seulement, la succession des opérations culturales d'intérêt pour une étude particulière. Il a été développé sous la plateforme informatique Dièse (Discrete Event Simulation Environment, Martin-Clouaire et Rellier, 2009) et permet de simuler les itinéraires techniques en tenant compte des contraintes d'organisation du travail au sein des exploitations (Martin-Clouaire *et al.*, soumis).

Dans Dhivine, les itinéraires techniques et leur distribution entre les différentes parcelles en vigne d'une exploitation sont spécifiques d'un contexte climatique et de pression phytosanitaire. Ils sont le résultat de la mise en œuvre d'un plan d'action qui définit une liste de chantiers à réaliser. Un chantier est la mise en œuvre d'une opération culturale sur tout ou partie du vignoble de l'exploitation. Il se caractérise par le type de matériel et de main d'œuvre mobilisables pour son exécution, par un mode d'organisation (une parcelle après l'autre ou plusieurs parcelles à la fois), des conditions de déclenchement et d'arrêt (par exemple, un stade phénologique de vigne, un cumul de pluie, une date, la fin d'un autre chantier), les parcelles concernées et leur ordre de passage. Lorsque deux chantiers sont en concurrence pour l'allocation des ressources en matériel et main d'œuvre ou l'exécution, des priorités d'allocation et d'exécution déterminent la façon dont le plan est réalisé.

Paramétrer une exploitation dans le modèle Dhivine consiste essentiellement à décrire sa structure (son vignoble, son matériel et sa main d'œuvre) et à lui affecter une stratégie de conduite, i.e. un plan d'action et un ensemble d'options de gestion de concernant : (i) les conditions de déclenchement et d'arrêt ainsi que les modes d'organisation des différents chantiers ; (ii) pour les chantiers d'entretien du sol, la définition des parcelles et des rangées (rangs, inter-rangs) concernées par chaque chantier; (iii) les degrés de priorité de chaque chantier pour l'allocation des ressources et l'exécution. C'est donc par la paramétrisation de la stratégie de conduite des exploitations que l'on a pu prendre en compte la répartition spatiale des modalités d'entretien du sol liée à chaque stratégie de réduction des usages d'herbicide. En l'absence de données sur les structures des exploitations du bassin du Rieutort, les parcellaires des exploitations du bassin ont été reconstitués à partir de données du Registre Cadastral Parcellaire (RPG) et du dernier recensement agricole, et du matériel et de la main d'œuvre standards ont été affectés à chacune des exploitations.

2.1.2 Des modèles d'évolution des états de surface et du couvert herbacé

La modélisation de l'évolution des états de surface (EdS) et de leur propriété d'infiltration sous l'effet du climat et des opérations culturales s'est appuyée sur la distinction de plusieurs types de trajectoires d'évolution en fonction du type d'entretien du sol. Trois types ont été identifiés: une trajectoire d'évolution des EdS i) sur sols nus et travaillés, ii) sur sols désherbés chimiquement, et iii) sur sols avec un enherbement permanent, issu de la croissance d'une végétation herbacée spontanée.

Considérant que dans les situations d'enherbement permanent, les EdS et leurs propriétés d'infiltration étaient invariantes, l'évolution des EdS après une opération culturale n'a été modélisée que pour les deux premières trajectoires.

Considérant par ailleurs que l'évolution des états de surface du sol après une opération culturale était liée à la combinaison de deux processus éventuellement combinés: un processus de développement d'une croûte structurale et un processus de développement d'un enherbement naturel spontané, la modélisation de trajectoires d'évolution des Eds a été basée sur le développement d'un sous-modèle pour chacun de ces processus. Les sous-modèles résultants ont été intégrés dans la modélisation générale des flux à l'échelle du bassin versant sous la plateforme OpenFluid.

Un modèle de formation d'une croûte structurale a été développé pour la trajectoire d'évolution des EdS sur sols nus et travaillés à partir d'une approche statistique (Paré et al., 2011). Cette approche a montré que, tant que le sol restait nu l'évolution de l'état de surface du sol après le travail, était sous la dépendance de la hauteur de pluie et principalement de son énergie cinétique.

Un modèle de développement d'un couvert herbacé spontané plurispécifique après travail du sol ou désherbage chimique, a été développé en considérant deux phases dans le développement des plantes herbacées : l'émergence et la croissance. La modélisation de l'émergence repose sur le calcul du nombre de graines qui germent chaque jour en fonction de l'état hydrique du sol et des sommes de température subies. La croissance est quant à elle modélisée au travers de l'augmentation du poids sec et de la couverture végétale de chaque cohorte journalière de graines germées. L'augmentation est calculée en fonction de paramètres des espèces concernées et des conditions météorologiques (somme des températures) depuis la germination. Ceci permet d'estimer l'évolution du degré de couverture du sol par les adventices et de simuler le changement d'état de surface et de conductivité

hydraulique de l'horizon de surface quand le degré de couverture dépasse 50 %. Le paramétrage des modèles s'est appuyé sur un travail d'observation de la flore dans le bassin versant du Rieutort et de caractérisation d'enherbements-types. A partir de relevés floristiques *in situ*, deux enherbements-types composés des cinq espèces les plus fréquentes sur le bassin ont été constitués i) sur la période automne-hiver et ii) sur le printemps. Pour enherbement-type une espèce moyenne a été considérée, caractérisée par des traits fonctionnels moyens agrégés à partir des traits des espèces le composant.

Le bilan hydrique d'une vigne enherbée a été modélisé avec le modèle WaLIS. Un couvert unique moyen, regroupant les caractéristiques de l'enherbement hivernal et printanier, a été considéré. Le LAI initial a été fixé à 0, afin que le modèle simule la levée d'un couvert non établi en début de simulation. La date de levée et de début de simulation a été fixée au 1^{er} septembre. Les formalismes de croissance de l'herbe issus du modèle de croissance de l'herbe (Pare, 2011) ont permis de déterminer le taux d'accroissement du LAI. La germination ayant lieu avant le développement végétatif de l'herbe (croissance des feuilles notamment), seul le processus de croissance a été pris en compte dans le calcul du LAI rate. Pour la sénescence du couvert, une moyenne des valeurs de Leaf Life Span (LLS) de chaque espèce composant le couvert est réalisée pour chaque période (automne/hiver et printemps/été) et entre les périodes pour obtenir un LLS unique pour l'enherbement type. Enfin, la régulation de la croissance de l'enherbement a été modélisée.

2.1.3 Des modèles de simulation des stress hydrique et azoté pour estimer le rendement

Le rendement potentiel d'une parcelle est défini par le climat, le type de sol, la densité de plantation et le cépage (van Ittersum et al., 2013). Chaque étape de l'élaboration du rendement, si elle est limitée par l'occurrence d'un facteur limitant, réduit successivement le rendement potentiel à une valeur maximum atteignable à la vendange. Si l'effet des facteurs limitants sur chaque étape de l'élaboration du rendement est connu et quantifié (e.g. effet du stress hydrique à la floraison de l'année n-1 sur la formation des inflorescences (Guilpart et al., 2014), alors des indicateurs de l'évolution du rendement maximum peuvent être calculés et confrontés à l'objectif de rendement. Dans cette étude, nous avons utilisé les simulations des stress hydriques à la floraison (Celette et al., 2010), paramétré sur le bassin versant du Rieutort) et stress azoté (méthode du bilan tenant compte des prélèvements de l'enherbement) pour évaluer le pourcentage de réduction du rendement potentiel de la parcelle déclaré par le viticulteur. Nous pouvons ainsi identifier les modalités de gestion du sol et les conditions climatiques qui permettent un maintien des rendements et celles qui engendrent un risque de perte trop important et sont donc à ce titre inacceptable pour les producteurs.

2.1.4 Un modèle hydrologique distribué pour simuler le ruissellement polluant

Pour permettre la simulation des flux de ruissellement et de pesticides à l'exutoire du bassin versant en fonction de la distribution spatiale des itinéraires techniques au sein du bassin, une modélisation biophysique spécifique a été développée. Cette modélisation est chaînée avec le modèle Dhivine selon le schéma en Figure 16.

La modélisation biophysique a été développée sur la plateforme de modélisation OpenFLUID (Fabre et al., 2010). Elle considère en entrée i) les calendriers culturaux, simulés avec le modèle Dhivine, relatifs aux opérations d'entretien du sol, ii) les caractéristiques climatiques des années test, iii) les caractéristiques du milieu physique : propriétés des sols, parcellaire cultural et topologie du réseau hydrographique. Elle couple i) la modélisation de l'évolution des états de surfaces et de l'infiltrabilité des sols en fonction de la nature du sol, des opérations d'entretien du sol, de la croissance de la végétation adventice et de l'énergie cinétique de la pluie, présentée au § 2.1.2., et ii) le modèle hydrologique distribué MHYDAS (Moussa et al., 2002) qui, dans sa version la plus récente (2014), simule le bilan hydrique et le ruissellement en eau et pesticides des parcelles agricoles ainsi que les écoulements résultants dans le réseau hydrographique auquel sont connectées les parcelles. Au cours du projet, MHYDAS a été modifié afin de prendre en compte l'existence de différents entretiens du sol au sein d'une parcelle. A cet effet, le partage ruissellement/infiltration, le calcul du bilan hydrique du sol et le transfert de pesticides sont différenciés pour différentes sous-unités parcellaires correspondant aux différents entretiens menés sur les rangs et inter-rangs de la culture.

2.2 Les résultats de l'évaluation par modèle

2.2.1 Les itinéraires techniques simulés

Pour chaque stratégie et chaque type de climat, les simulations ont généré une diversité d'itinéraires techniques d'entretien du sol, spatialement répartis dans le bassin versant. Ces itinéraires techniques se différencient, (i) par les techniques utilisées et leurs localisations au sein de la parcelle, tous deux dépendant de la modalité d'entretien du sol affectée à la parcelle, et (ii) par les calendriers de travail du sol et de désherbage chimique, tous deux sous la dépendance des conditions de déclenchement des opérations culturales affectées aux exploitations et des vitesses d'avancement liées aux ressources en matériel et main d'œuvre. Les résultats montrent qu'il n'y pas de différence majeure de calendrier cultural entre stratégies du fait de la rapidité d'exécution des opérations culturales d'entretien du sol et que l'impact du climat sur ce calendrier dépend de l'opération culturale concernée. Pour les trois stratégies concernées par du désherbage chimique, quels que soient les scénarios climatiques, le désherbage chimique s'étale entre fin février et début avril. Dans chaque exploitation, les dates de réalisation du désherbage chimique dépendent de la date de fin de taille et de broyage des sarments, elle-même sous la dépendance du nombre d'hectares à tailler par unité de main d'œuvre. Ces dates sont peu sensibles aux variations de pluviométrie. A l'inverse, pour les quatre stratégies, le calendrier de réalisation du travail du sol est très sensible à la pluviométrie du printemps et de l'été, avec pour conséquence une variation du nombre de travaux du sol et des dates de réalisation de chacun d'entre eux selon les climats testés et notamment selon la répartition des événements pluvieux. Sur l'ensemble des parcelles en vigne du bassin versant, quelle que soit la stratégie simulée, le nombre de travaux du sol se situe quasi exclusivement entre 2 et 3 pour les printemps-été secs et entre 3 et 4 pour les printemps-été à pluviométrie moyenne ou humide.

2.2.2 L'évaluation des bilans hydriques et azotés et de leurs conséquences sur le rendement

Les simulations de bilan hydrique et azoté, réalisées sur cinq parcelles, ont permis d'étudier la pertinence de l'enherbement hivernal ou permanent dans des parcelles de vigne du bassin versant du Rieutort. Les résultats sont résumés dans le Tableau 35, (partie 4). Notons que l'évaluation des rendements a été réalisée sur des parcelles types, correspondant aux cinq principaux types de sol du bassin versant. Sur chaque parcelle l'évaluation a été réalisée pour les deux modalités d'entretien du sol qui lui ont été affectées (une modalité pour la stratégie 1a, une autre pour la stratégie 2a) et pour neuf années climatiques types de la région ; ces résultats ne sauraient donc être extrapolés à l'ensemble du bassin versant sans précaution.

De manière générale, on note des risques de stress hydrique élevé dans le bassin versant, dans la majorité des situations simulées. Lors d'années climatiques sèches, toutes les parcelles présentent un déficit hydrique important, excepté pour celle localisée dans la plaine alluviale et caractérisée par un sol relativement profond (2 m de profondeur) avec des remontées capillaires de la nappe. Pour les autres climats simulés, le stress hydrique éprouvé par la vigne est plus limité mais la fraction d'eau disponible pour la vigne dans le sol (\approx fraction d'eau du sol transpirable: FTSW) peut être limitante au moment de la floraison ce qui engendre un risque de perte de rendement. Enfin, dans le cas de sols superficiels (sols de transition et pierreux peu profond), le climat printemps/été est déterminant pour le bilan hydrique des vignes : les réserves hydriques sont faibles et la recharge hivernale des sols perd de son importance. De fait, dans le cas de cette approche par modélisation, la caractérisation des réserves hydriques de chaque parcelle étudiée est essentielle pour la qualité des estimations des conséquences des modalités de gestion pour la production viticole.

Concernant le bilan azoté des parcelles sous l'effet des modalités de gestion, il faut garder à l'esprit que l'enherbement peut concurrencer directement la vigne par ses prélèvements d'azote. La période durant laquelle l'herbe est présente dans la parcelle (hiver, printemps) ainsi que la phénologie de la vigne (débourrement, floraison...) sont déterminantes pour évaluer l'impact de cette compétition directe sur le rendement : la pratique d'un enherbement uniquement hivernal pourrait constituer une solution permettant de limiter le ruissellement en hiver, d'immobiliser l'azote pouvant être sujet à la

lixiviation, et de restituer cet élément au sol après destruction/enfouissement. La compétition directe avec la vigne lors de son développement est ainsi évitée. Les prélèvements d'eau effectués par le couvert végétal peuvent également affaiblir le processus de minéralisation de l'azote dans les sols, mais les résultats présentés dans cette étude ne sont pas suffisants pour conclure de manière quantitative. Il faudrait pour cela étudier le processus de minéralisation plus finement (calculs journaliers ou saisonniers), et disposer de plusieurs modalités (parcelle enherbée et non enherbée) pour comparer les situations.

Tableau 35 Synthèse des effets des modalités d'entretien du sol sur les rendements en considérant 3 années types (année humide, année moyenne et année sèche)

Type de sol	Rendement objectif	Modalité d'entretien du sol		Risque de stress		Rendement attendu			Acceptabilité de la modalité d'entretien du sol
		Stratégie 1a	Stratégie 2a	Hydrique	Azoté	Année sèche (SS)	Année moyenne (MM)	Année humide (HH)	
Alluvial	80	Enherbement permanent des inter-rangs – Sous les rangs enherbement hivernal suivi de désherbages mécaniques (S5)	Idem que 1a mais désherbage chimique du rang au printemps (S5')	Pas de stress	Fort	Pas de perte si complément de fertilisation	Pas de perte si complément de fertilisation	Pas de perte si complément de fertilisation	Acceptable quel que soit le climat de l'année
Molasse	45	Enherbement permanent des inter-rangs – Sous les rangs enherbement hivernal suivi de désherbages mécaniques (S5)	Idem que 1a mais désherbage chimique du rang au printemps (S5')	Imptnt en année sèche	Pas de stress	- 66 % du rendement objectif	- 31% du rendement objectif	à - 22 % du rendement objectif	Difficilement acceptable, gestion de l'enherbement délicate
Fersialitique	45	Enherbement permanent des inter-rangs – Sous les rangs enherbement hivernal suivi de désherbages mécaniques (S5)	Idem que 1a mais désherbage chimique du rang au printemps (S5')	Modéré	Pas de stress	- 31 % du rendement objectif	- 5 % du rendement objectif	Pas de perte de rendement	Acceptable les années moyennes et humides (au moins 6 années sur 9)
Pierre peu profond	20	Enherbement hivernal des rangs et inter-rangs suivi de désherbages mécaniques (S1)	Idem que 1a mais désherbage chimique du rang au printemps (S1')	Imptnt et permanent	Pas de stress	Rendement très pénalisé (0 d'après estimation)	- 83 % du rendement objectif	- 66% du rendement	Inacceptable car les réserves hydriques du sol sont insuffisantes
Transition	80	Enherbement permanent de 1 IR sur 2 – Enherbement hivernal suivi de désherbages mécaniques sous les rangs et 1 IR sur 2 (S3)	Idem que 1a mais désherbage chimique du rang au printemps (S3')	Modéré	Risque de stress	- 66 % du rendement objectif	- 14 % du rendement objectif	à - 5% du rendement objectif avec complément de fertilisation à prévoir	Acceptable les années humides et certaines années sèches (~1 année sur 2)

Finalement, l'évaluation des effets des contraintes hydriques et azotées simulées sur le rendement sous l'effet des modalités d'entretien du sol choisie pour chacune des stratégies de réduction des herbicides met en avant le caractère acceptable de ces modalités pour les parcelles sur sols profonds

en année humide. Ainsi, en situation d'année climatique humide, le maintien d'un d'enherbement permanent ou hivernal est acceptable du point de vue du rendement pour trois parcelles (respectivement localisées sur sols alluvial, fersiallitique et de la zone de transition) car elle induit par rapport aux objectifs de rendements actuels des viticulteurs soit une conservation des rendements, soit une diminution légère (5 %). Par contre, ces modalités d'entretien sont inacceptables en année sèche. De manière générale, la pratique de l'enherbement (hivernal et a fortiori permanent) ne peut se réaliser que lorsque les sols le permettent en termes de profondeur, car les réserves hydriques peuvent supporter une sécheresse, et la vigne est capable de prélever l'eau en profondeur. Pour des sols trop superficiels, le risque de stress hydrique et donc de stress azoté est trop important, d'autant que la fréquence d'années sèches est relativement élevée dans la région. Ce résultat est en apparente contradiction avec la carte d'aptitude établie lors de l'étude préliminaire du projet, mais peut s'expliquer par le fait d'avoir pris plus finement en compte (i) la caractérisation des réserves hydriques des sols ; (ii) la nature et la dynamique de croissance de l'enherbement spontané du bassin ; (iii) le bilan d'azote des parcelles viticoles et (iv) la dynamique azotée des sols et iii) la variabilité climatique du bassin versant, à travers la génération de 9 climats types.

Au final, les différences entre les parcelles semblent dépendre plus fortement de leur caractéristiques hydriques (profondeur du sol, texture, capacité de rétention) que de leurs modes de gestion respectifs. Le facteur déterminant dans l'acceptabilité est la variabilité climatique très importante de la région et suggère que les pratiques d'entretien des sols doivent être ajustées chaque année pour cadrer avec la réalité climatique et les contraintes subies par la vigne.

2.2.3 L'évaluation des impacts environnementaux

Les impacts environnementaux des 4 stratégies normatives sur le bassin versant du Rieutort ont été simulés avec le modèle MHYDAS. Le tableau 39 (partie 4) présente une synthèse des résultats.

Tableau 39: Valeurs simulées des concentrations maximales annuelles et des pertes cumulées en pesticides à l'exutoire du bassin du Rieutort selon les 4 stratégies normatives

Stratégie	Pression (% de la surface viticole désherbée chimiquement)	Pertes en pesticides (kg)			Taux de pesticides sortant (appli = 2kg/ha) (%)		
		moyenne	minimum	maximum	moyenne	minimum	maximum
2b	38 %	2,68	<0,0001	4,70	0,24	<0,0001	0,40
2a	34 %	2,40	<0,0001	4,34	0,24	<0,0001	0,42
1b	4 %	0,21	<0,0001	0,41	0,18	<0,0001	0,34
1a	0 %	0	0	0	0	0	0

Stratégie	Pression (% de la surface viticole désherbée chimiquement)	Concentration maximale (µg/L)			Ruissellement (mm)		
		moyenne interannuelle	minimum	maximum	moyenne	minimum	maximum
2b	38 %	2,12	0,0001	3,48	181,83	49,99	288,27
2a	34 %	2,00	<0,0001	3,35	181,67	49,98	288,07
1b	4 %	0,17	<0,0001	0,33	181,08	49,92	286,32
1a	0 %	0	0	0	180,85	49,92	286,15

Les résultats obtenus confirment l'effet d'ordre 1 de l'intensité de la pression phytosanitaire sur l'intensité de contamination des eaux. Ce résultat attendu, mais très délicat à démontrer par des observations in situ en raison de la méconnaissance très fréquente des pratiques de traitement à l'échelle des bassins versants, est quantifié ici par l'approche de modélisation. Il indique la pertinence de rechercher prioritairement des stratégies économes en herbicides pour l'entretien des sols. Ce sont les stratégies évitant de manière généralisée l'emploi d'herbicides qui sont les seules viables à terme en matière de respect de la qualité des ressources en eau. En effet, même la stratégie 1b, qui n'autorise de fait des traitements que sur moins de 2 % de la surface du bassin, produit des niveaux significatifs de contamination à l'exutoire du bassin. La forte variabilité inter-annuelle des contaminations simulées confirme la nécessité de comparer des stratégies sur un ensemble d'années

et indique les biais potentiels d'expérimentations de courte durée pour sélectionner des stratégies d'entretien du sol plus préservatrice des ressources en eau.

On notera que les ordres de grandeurs des débits et concentrations en pesticides simulés sont cohérents avec les ordres de grandeurs des valeurs observées sur les sites expérimentaux situés dans des conditions climatiques, agronomiques et pédologiques proches. La modélisation, bien qu'élaborée, présente de nombreuses limites, qu'il convient d'avoir à l'esprit. Trois limites majeures peuvent être citées.

- **La faiblesse des informations sur le comportement des sols** du bassin du Rieutort qui nous a conduit à extrapoler des données acquises sur le bassin versant de Roujan (ORE OMERE), situé à proximité. Pourtant le Rieutort bénéficie d'une carte des sols à l'échelle du 1/100 000^{ème}, qui est plus précise que celle disponible en général en France (échelle du 1/250 000^{ème}). Malgré les efforts conséquents faits par la communauté du sol ces dernières années, la question de l'acquisition d'une connaissance spatialisée des sols et de leurs propriétés à une résolution spatiale suffisante reste posée dans le cadre d'une application environnementale telle que développée ici.
- **Le caractère encore frustrant de la modélisation du développement de la végétation herbacée spontanée**, qui n'intègre pas les effets négatifs de la sécheresse à ce stade et d'autres effets possibles générant une faible levée et donc une faible couverture. De ce fait, la modélisation surestime sans doute le degré de couverture des sols par les adventices au cours de l'année, ce qui revient à minimiser quelque peu les flux de ruissellement à l'échelle parcellaire.
- **L'absence de prise en compte des échanges surface-souterrain, notamment dans le réseau hydrographique**, en raison d'une méconnaissance des aquifères du Rieutort et de leurs connexions avec la surface. La conséquence en est une dynamique modifiée des débits à l'exutoire du bassin, avec une maximisation des crues qui suivent les périodes sèches, puisqu'aucune réinfiltration n'intervient dans le réseau et une sous-estimation des débits entre crues, puisqu'aucun débit de base n'est simulé.

Au-delà de l'analyse des stratégies normatives envisagées dans ce projet, le résultat majeur de cette partie est la construction d'un modèle biophysique, complexe mais opérationnel, qui ouvre de nombreuses possibilités. Il doit certes encore être amélioré, cf. les limites évoquées ci-dessus, mais d'ores et déjà il permet de tester l'effet de choix techniques à l'échelle du bassin versant sur le transfert de pesticides vers l'exutoire par ruissellement de surface. De plus, son couplage avec le modèle de décision Dhivine permet d'évaluer à présent dans le cas de bassin viticoles des stratégies d'entretien du sol à l'échelle des exploitations d'un bassin. Ceci autorise le test de l'impact d'itinéraires techniques résultant de conditions d'exploitation variables i) spatialement en fonction des contraintes de sol, ii) temporellement en fonction des contraintes climatiques et iii) spatio-temporellement en fonction des moyens humains et techniques des exploitations.

2.3 Bilan de l'évaluation par modélisation

2.3.1 Les performances productives et environnementales des stratégies

Les résultats de l'évaluation des performances productives montrent qu'il n'y a pas de différences entre stratégies au niveau de la production car les durées d'enherbement sont les mêmes (et le mode de destruction chimique ou mécanique n'a pas d'incidence sur le niveau de production). Ils montrent également que les éventuelles pertes de rendement sont plus liées à un problème de stress hydrique qu'à un problème de stress azoté (qui peut être de plus évité par une fertilisation adaptée, en dose et en forme d'apport). Finalement, le résultat le plus marquant est que, **telles quelles, les stratégies ne sont pas viables**. Les niveaux de rendements espérés sont tous très variables selon les années, bien qu'avec plus ou moins d'intensité selon les types de sol (et leur statut hydrique qui dépend notamment de la profondeur). Ce résultat suggère la nécessité de passer de modalités d'entretien du sol basées sur une répartition spatio-temporelle fixe de l'enherbement au sein des parcelles à **des modalités plus flexibles** basées sur un enherbement variable en durée et en répartition au sein de la parcelle selon les années. La prise en compte, par exemple, d'un indicateur de stress hydrique pourrait être étudiée, même si cela peut s'avérer difficile à gérer par l'agriculteur du fait de la nécessaire anticipation sur le risque de stress hydrique.

Les résultats de l'évaluation environnementale montrent clairement la nécessité de diminuer la pression phytosanitaire pour diminuer l'intensité de la contamination des eaux. La **stratégie zéro herbicide** est à terme la seule à même d'assurer **le respect de la qualité des ressources en eau** tout au long de l'année (pour un seuil de potabilité de l'eau de 0,01 µg/l). Néanmoins, dans le cas où – pour une période éventuellement transitoire - un niveau de contamination maximal supérieur au seuil resterait toléré, les faibles différences de concentrations en herbicide des eaux de ruissellement entre les stratégies 2a et 2b et entre les stratégies 1a et 1b, montrent que **l'introduction d'un peu de flexibilité dans l'usage des herbicides est envisageable**.

2.3.2 La chaîne de modélisation

Une telle évaluation des performances productive et environnementales de stratégies de réduction des herbicides n'aurait pas été possible sans la chaîne de modélisation qui a été développée au cours du projet. Cette chaîne est basée sur :

- **un modèle de décision** pour la viticulture, permettant de simuler les itinéraires techniques viticoles mis en œuvre sous différents climats en tenant compte des choix de gestion technique du vignoble et des ressources des exploitations ;
- **un modèle d'évolution des états de surface** du sol basé sur la prise en compte des processus biophysiques à l'origine de ces évolutions (la formation d'une croûte structurale et le développement d'un couvert herbacé sous l'effet du climat et des itinéraires techniques) ;
- **un modèle de bilan hydrique** pour une association herbe-vigne, un bilan azoté couplé et un indicateur des impacts des stress hydrique et azoté sur la réduction du rendement potentiel ;
- **un modèle hydrologique de transfert de polluants** prenant en compte des processus hydrologiques variables sur une parcelle du fait de modes d'entretiens du sol variables selon les rangs et inter-rangs d'implantation de la culture.

Nous disposons à présent d'une chaîne de modélisation complète utilisable pour tester les impacts productifs et environnementaux de stratégies techniques aux échelles de la parcelle, de l'exploitation viticole et du bassin versant. Néanmoins **quelques limites actuelles des modèles** et de leur chaînage sont à mentionner.

Concernant **le modèle de décision Ddivine**, le choix de modéliser les itinéraires techniques, en tenant compte pour chaque exploitation concernée des caractéristiques de son vignoble, de ses ressources en matériel et main d'œuvre, et de sa stratégie de conduite du vignoble, a du sens. A stratégie équivalente, ce choix permet de rendre compte de la variabilité des itinéraires techniques liée aux conditions d'exploitation. Cependant, un tel choix se traduit par de nombreux paramètres à renseigner pour chaque exploitation simulée. Certains de ces paramètres sont difficilement accessibles lorsque l'on travaille sur des territoires importants. Ils concernent en effet des données privées qui ne sont pas toutes accessibles à l'échelle individuelle dans les bases données des recensements agricoles et des enquêtes exhaustives pour les recueillir ne peuvent être envisagées. La résolution de cette difficulté sur le bassin du Rieutort est passée par le choix d'une paramétrisation simplifiée des ressources en matériel et main d'œuvre et par la non prise en compte de toutes les opérations techniques susceptibles d'entrer en concurrence avec les opérations d'entretien du sol. Par ailleurs, le modèle inclut une large gamme d'options de gestion des différentes opérations culturales nécessaires à la conduite d'un vignoble. Il n'offre cependant pas encore une gamme de choix suffisamment large pour simuler toutes les flexibilités possibles des conduites techniques dans les exploitations agricoles.

Pour **l'évaluation productive à l'aide des bilans hydriques et azotés**, les principales limites sont (1) la simulation des effets des conduites techniques des parcelles types et non sur l'ensemble des parcelles du bassin versant ; (2) la simplification de l'encépagement et du mode de conduite (Syrah) pour l'évaluation des pertes de rendement ; (3) la non prise en compte des flux d'azote hors du système plante-enherbement dans les situations faiblement enherbées (pour lesquelles le risque de lixiviation existe et peut modifier le bilan azoté).

Pour l'évaluation environnementale à l'aide du modèle hydrologique, les deux principales limites sont (1) la non prise en compte du stress hydrique et de la sénescence dans la modélisation du développement des adventices dans MHYDAS conduit à surévaluer la présence d'herbe sur les parcelles et donc à limiter artificiellement le ruissellement simulé, et (2) la méconnaissance à une résolution suffisante des propriétés du milieu nécessaires au paramétrage des simulations.

Enfin une limite de l'ensemble de la chaîne de modélisation concerne l'absence de couplage entre modélisation décisionnelle, bilans hydriques et azotés et le modèle hydrologique. Un couplage des modèles (avec rétroactions des modèles entre eux) au lieu du chaînage actuel (sans possibilités de rétroactions) permettrait de mieux adapter les itinéraires techniques simulés aux conditions hydriques et de production des parcelles. Par ailleurs, il rendrait cruciale la question de l'homogénéisation entre les différents modèles des choix de représentation des processus (par exemple, de développement du couvert végétal et de bilan hydrique).

En dehors de la question de l'accessibilité des données nécessaires au paramétrage des modèles, les différents points évoqués sont des points d'amélioration potentiels pour le futur.

3 L'évaluation à dire d'acteurs

L'évaluation à dire d'acteurs des stratégies candidates a été basée sur la réalisation et l'analyse d'entretiens auprès d'un échantillon de viticulteurs du bassin. Ces entretiens portaient sur les pratiques d'entretien du sol actuelles, les évolutions envisagées et les réseaux de dialogue professionnels. Leur analyse a permis d'aborder la question des logiques de changements pour la réduction des usages d'herbicides appréciées à un niveau individuel et à un niveau collectif.

3.1 Les logiques de changement au niveau individuel

Dans le bassin versant étudié, et pour les viticulteurs « professionnels » les marges de manœuvre pour réduire l'usage des herbicides concernent uniquement la gestion du rang de vignes (ce qui représente au maximum 1/3 de la superficie parcellaire). Dans l'inter-rang les pratiques ont déjà très majoritairement exclus le recours aux herbicides et ce depuis plusieurs années. Ce point mérite d'être souligné car il dénote une dynamique forte de changement chez les agriculteurs et une très forte réduction de l'IFT herbicide (on peut faire remonter cette dynamique au début des années 2000) et interroge sur le fait de ne pas constater d'amélioration des masses d'eau. Le saut supplémentaire et ultime à réaliser qui serait l'abandon total des désherbages chimiques sous le rang apparaît toutefois plus difficile à concevoir et à réaliser pour un certain nombre de viticulteurs, même si là également il existe une tendance à un usage en développement des outils inter-ceps et donc à une réduction d'usage de produits chimiques ; on peut penser que là aussi le temps passant un état proche du 0 herbicide (au moins certaines années) pourrait être atteint.

Le nœud de la transition vers le 0 herbicide est l'usage d'un outil inter-ceps. Usage ne veut pas dire achat (on peut « bricoler » un outil plus ou moins bien approprié) et achat ne veut pas dire usage (du fait des temps de travaux importants avec cet outil ou d'une déception quant à l'efficacité escomptée), de plus ces outils ne sont pas toujours achetés avec une aide financière. On peut alors s'interroger sur l'intérêt qu'il y aurait (1) à favoriser les échanges entre agriculteurs (et avec des constructeurs/artisans) autour de ces questions de machinisme agricole et d'adaptation des outils et (2) à favoriser également les recours à l'entreprise (entrepreneuriat) afin de résoudre la question du manque de temps (pour utiliser ces outils) chez certains agriculteurs.

Concernant la souscription aux mesures d'aide (MAE), on peut être quelque peu surpris par la manière avec laquelle les agriculteurs adhèrent à ces mesures. En effet, même ceux qui font partie du groupe des utilisateurs intensifs d'herbicides sous le rang souscrivent des contrats « 0 herbicides » sur une partie de leur exploitation (pratiques très contrastées entre parcelles). Même s'il convient d'évoquer les effets d'aubaine, il est certain que cela amène ces viticulteurs à expérimenter sur certaines de leurs parcelles en vue de concevoir de nouvelles stratégies pour l'avenir (ils savent qu'ils

vont devoir évoluer). Il importe de mentionner que la souscription aux MAE peut être fortement remise en cause par les agriculteurs, la raison principale étant le manque de souplesse que cela occasionne, les agriculteurs recherchent des combinaisons de pratiques que le contrat ne permet pas : ainsi pouvoir associer l'inter-ceps à l'herbicide de post-levée (selon les parcelles et les années) constitue une sécurité fortement appréciée.

Les stratégies conçues par les experts se sont focalisées sur l'idée **d'apporter une certaine souplesse aux agriculteurs** en autorisant des « dérogations » sur des parcelles dites « à problème ». L'idée s'est avérée judicieuse, mais pour être efficace il convient de modifier cette notion de souplesse, celle-ci doit être au moins autant si ce n'est **plus temporelle que spatiale** (faire succéder dans un itinéraire technique des méthodes mécaniques et chimiques si nécessaires). Par ailleurs, lorsqu'elles traitent de dérogations spatiales, les stratégies conçues par les experts sont insuffisamment contrastées pour satisfaire les agriculteurs. Cela plaide pour que, dans **la construction de scénarios, soient associés des praticiens** car ils sont les plus à même de faire état des risques et de proposer des formes de souplesse adaptées à leurs situations.

On notera que les entretiens n'ont pas été spécifiquement centrés sur la question de l'enherbement et n'apportent pas beaucoup d'éléments sur la gestion de l'enherbement par les viticulteurs. On peut juste noter seulement que le fait de laisser l'herbe naturelle pousser en hiver ou un peu plus longtemps au printemps était spontanément évoqué, ce qui n'a pas été le cas pour l'enherbement permanent, suggérant un faible intérêt pour cette dernière pratique.

3.2 Les logiques collectives de changement

Une de nos hypothèses est que la capacité des agriculteurs à s'impliquer largement, de manière maîtrisée, dans la mise en œuvre de pratiques alternatives à celles déployées jusqu'à présent est fortement liée à leur possibilité d'accéder à des ressources cognitives et sociales pertinentes, en s'inscrivant dans un **espace local de dialogues professionnels sur les pratiques**.

Les liens entre les individus trouvent leur origine dans des groupes formels auxquels ils peuvent participer, dans des groupes informels ou des rapports de voisinage. Les groupes formels sont pour la plupart des associations petites et locales qui sont citées par les viticulteurs comme lieu où l'on peut échanger sur les pratiques. On observe ainsi que les pratiques d'entretien du sol sont en cours d'évolution et qu'elles sont discutées et font l'objet d'un certain nombre de réflexions.

Les viticulteurs citent les technico-commerciaux de l'agrofourniture comme étant des appuis pour orienter leurs pratiques. Ils s'appuient sur leurs recommandations pour les choix de produits de traitement. Pour la plupart, ils disent être « bien informés » : entre les journaux, les bulletins techniques, les formations et les techniciens le problème est plutôt de trouver le temps nécessaire pour tout utiliser.

De nombreux liens sont essentiellement noués entre les viticulteurs du bassin et quelques uns sont tissés avec des viticulteurs des alentours. Le bassin versant paraît donc une limite géographique pertinente pour appréhender les liens sociaux entre viticulteurs. La plupart des viticulteurs se connaissent même s'ils n'entretiennent pas de liens entre eux. On compte 217 liens entre les viticulteurs du bassin du Rieutort dont 49 n'ont pas été enquêtés. Seulement 30 liens sont noués avec des viticulteurs de bassins limitrophes. Le réseau a une forme globale de noyau - périphéries, où le noyau regroupent des viticulteurs fortement interconnectés entre eux et les périphéries de viticulteurs situés sur le pourtour du noyau et plus faiblement interconnectés avec les membres du noyau : ils sont localement socialement moins fortement intégrés. Trois positions des viticulteurs peuvent être distinguées : le noyau du réseau, la première périphérie et la seconde périphérie. Les viticulteurs de la première périphérie ont des liens avec des viticulteurs du noyau et avec ceux de la seconde périphérie. La seconde périphérie est constituée principalement de viticulteurs non enquêtés mais pas uniquement.

Les types de pratique identifiés peuvent être positionnés sur le réseau pour voir le lien entre les positions pratiques et les positions sociales des individus. Plus les viticulteurs ont des pratiques de

désherbage importantes plus ils sont dans le noyau du réseau (6/11 du groupe 'désherbage fort'; 4/10 du groupe "désherbage standard"; 2/6 du groupe "faible usage d'herbicide" ; 1/4 du groupe "zéro herbicide"). De plus, parmi les cinq viticulteurs les plus centraux, trois sont des utilisateurs de désherbants. Ce noyau étant le lieu où se définissent les normes pratiques locales, ce constat fait apparaître une norme encore très centrée sur l'usage des désherbants. Parmi ces viticulteurs du noyau six (sur 16) sont des membres du conseil d'administration de la cave coopérative de Murviel-lès-Béziers et appartiennent à la grande CUMA à Causses-et-Veyran. Ils sont donc dans des institutions en capacité d'orienter les pratiques des viticulteurs. Toutefois ces viticulteurs du noyau ne sont donc pas complètement fermés aux changements de pratiques. Trois ont ainsi engagé des MAEt. De plus parmi les cinq viticulteurs plus centraux du noyau, deux font faiblement ou pas du tout usage de désherbants. Ce qui signifie que la norme dominante en matière d'entretien des sols se trouve concurrencée par les pratiques alternatives d'autres viticulteurs du noyau.

Nous avons donc affaire à une norme en cours de modification, qui accepte des variantes. Ainsi le groupe des 'bio' est bien intégré dans le réseau social et ne représente pas un groupe isolé. Toutefois ils sont principalement dans la première périphérie, et trois d'entre eux sont interconnectés. Le groupe 'très peu d'herbicides', dominé par des viticulteurs plus vieux que la moyenne issus de milieu agricole, sont également répartis entre le cœur du réseau et la première périphérie. Certains de ces viticulteurs de ce groupe peuvent avoir une position importante pour diffuser l'information et peuvent démarrer un processus de réflexion sur une réduction de l'utilisation de l'herbicide. Il faut noter qu'ils sont, comme les bio, dans la même zone du réseau. Ils appartiennent au même groupe de pratiques (groupe 2) et sont membres de la même coopérative (Murviel-lès-Béziers). La mise en œuvre d'alternatives à la norme dominante s'opère entre viticulteurs qui ont une certaine proximité dans leur position dans le réseau. Le groupe 'désherbage standard' qui est dominé par des viticulteurs avec une expérience professionnelle antérieure, est principalement situé (60 %) dans la première périphérie, cela veut dire qu'ils ne sont pas centraux dans la diffusion de l'information.

Cette approche du réseau de dialogues professionnels des viticulteurs du bassin permet de situer la **structure sociale présente** et la position qu'occupent les agriculteurs en fonction de leurs pratiques. Elle donne des indications sur la **dynamique de changements à l'œuvre** et des renseignements sur les viticulteurs en position d'intermédiation entre des cliques du réseau et donc en position d'introduire des idées nouvelles d'une clique à une autre. Elle offre une base pour mettre en place des actions de développement. Ces actions prêteront attention à l'état actuel des pratiques des viticulteurs du réseau, pour promouvoir celles qui leur sont aujourd'hui accessibles. Mais elles seraient aussi attentives dans l'organisation d'action de développement à la proximité sociale des individus, proximité qui ne tient pas directement de leur type de pratique. Ainsi des rencontres de viticulteurs en bio avec ceux fortement utilisateurs de désherbants peuvent être envisagées pour ceux qui se trouvent déjà en contacts entre eux dans le réseau. Ce travail offre aussi d'un point de vue de la recherche des moyens pour suivre la façon dont la dynamique de changements de pratique va s'opérer dans le futur en fonction du cadre d'accompagnement, du cadre réglementaire et du cadre marchand des viticulteurs. D'un point de vue sociologique, il permettra de suivre comment les transformations de pratique vont être ou non favorisées par ces liens sociaux, et comment des changements de pratiques vont ou non donner lieu à une reconfiguration du réseau.

4 Conclusion

Pour tirer les enseignements complets de la mise en œuvre de notre démarche et des résultats obtenus, une séance de travail collectif entre des acteurs extérieurs et les différents partenaires du projet sera organisée en mars 2015. Cette réunion n'a pu être programmée avant la rédaction de ce rapport en raison d'une finalisation trop tardive des simulations de comparaison des stratégies candidates de réduction d'utilisation des herbicides sur le Rieutort.

Le programme SP3A a permis de produire quatre scénarios reposant sur des stratégies de réduction des herbicides à l'échelle de la parcelle et du bassin versant.

L'analyse à dire de viticulteurs et les résultats des évaluations par modèles de ces stratégies convergent vers la question de l'introduction de plus de flexibilité dans la définition des stratégies de réduction des usages d'herbicide et des modalités d'entretien du sol associées.

Les entretiens ont permis d'identifier l'existence d'une norme technique encore très centrée sur un usage important d'herbicides mais qui admet l'existence de pratiques alternatives. Ils montrent que l'évolution vers une réduction des usages, voire un abandon total des herbicides, est a minima en débat et souvent mise en actes par des pratiques alternatives sur tout ou partie du vignoble des exploitations du bassin. Ils soulignent néanmoins que l'acceptabilité individuelle de cette évolution serait probablement facilitée par l'autorisation d'une plus grande souplesse temporelle et spatiale dans l'utilisation des herbicides que celle proposée dans les stratégies identifiées par les experts, et ce, pour faire face à des années ou à des parcelles difficiles. Du point de vue de l'impact environnemental, les résultats de l'évaluation par modèles indiquent qu'une certaine souplesse peut effectivement être autorisée sans modifier de manière drastique le niveau de contamination des eaux de ruissellement. A terme l'abandon total des herbicides, reste cependant la seule voie permettant de garantir la qualité des masses d'eau issues du ruissellement.

Ces résultats militent pour l'invention de stratégies plus flexibles sur l'usage des herbicides que celles proposées et évaluées. En même temps, ils posent la question du niveau de contamination acceptable pour définir et borner cette flexibilité et celle des critères à utiliser pour l'évaluation de la contamination (par exemple, concentration moyenne et/ou concentration maximum des eaux de ruissellement). De telles stratégies pourraient a minima être mises en œuvre au cours d'une ou plusieurs phases transitoires vers une cible zéro herbicide.

De son côté, l'évaluation productive montre que les stratégies doivent également intégrer une souplesse dans la gestion de l'enherbement naturel avec la prise en compte d'indicateurs permettant de supprimer le couvert végétal plus ou moins tôt en fonction de la sécheresse de l'année considérée, en particulier celle de la période hivernale.

L'identification de telles stratégies et de leurs critères d'évaluation ne pourra être possible qu'en élargissant le panel des experts mobilisés au cours de projet. Devront notamment être intégrés des praticiens-viticulteurs, seuls à même de proposer des solutions adaptées à leurs situations.

Les impacts productifs et environnementaux de stratégies plus élaborées et plus flexibles ne pourront être correctement évalués que si des améliorations sont apportées sur la chaîne de modélisation. Un point essentiel sera notamment la capacité du modèle Dhivine à simuler les itinéraires techniques issus de telles stratégies, ce qui suppose de pouvoir disposer d'indicateurs d'états de l'agrosystème pertinents (par exemple le niveau de stress hydrique des parcelles). Ce point repose la question du couplage entre les différents modèles. Une évaluation complète des stratégies englobant des aspects économiques, sociaux et liés au temps et à la pénibilité du travail auraient pu compléter le travail fait. La lourdeur de ces volets nous a conduit à choisir une évaluation qualitative des stratégies par les acteurs de terrain, intégrant implicitement l'argument économique.

Références bibliographiques

- Agence de l'eau RMC, 2004. "Pesticides dans les eaux superficielles et souterraines du bassin Rhône-Méditerranée-Corse : données 2002 et 2003." Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, Lyon, <http://www.eaurmc.fr>.
- Al Haj Khaled, R., Duru, M., Theau, J. P., Plantureux, S., & Cruz, P., 2005. Variation in leaf traits through seasons and N-availability levels and its consequences for ranking grassland species. *Journal of Vegetation Science*, 16(4), 391.
- Andrieux P., 2006. Effets des pratiques culturales sur le ruissellement et l'érosion. Séminaire Vigne, sol et environnement. INRA, Montpellier, 2006. Document en ligne : <http://www.montpellier.inra.fr/vignesolenv/actes/ANDRIEUX.pdf>
- Andrieux P., Louchart X., Negro S., Cambon B., Voltz M., 2007. Influence des pratiques d'entretien du sol viticole sur les transferts de glyphosate et d'AMPA par ruissellement. Trois années d'expérimentation. AFPP – Vingtième conférence du COLUMA. Journées internationales de lutte contre les mauvaises herbes Dijon, 11 et 12 décembre 2007.
- Andrieux, P., 2008. Soil surface characteristics and infiltration in Mediterranean cultivated areas, in E. Roose; J. Albergel; G. De Noni; A. Laouina & M. Sabir, ed., 'Efficacité de la gestion de l'eau et de la fertilité des sols en milieux semi-arides : actes de la session 7 organisée par le réseau E-GCES au sein de la conférence ISCO de Marrakech (Maroc), 14-19/05/2006', AUF, EAC, IRD (eds), Paris, pp. 362-366.
- Andrieux, P., Hatier, A., Asseline, J., de Noni, G. & Voltz, M., 2001. Predicting infiltration rates by classifying soil surface features in a Mediterranean wine-growing area. International symposium "The significance of soil surface characteristics in soil erosion". COST 623 "Soil erosion and global change" workshop. Strasbourg, 20-22 septembre 2001.
- Attonaty, J.-M., Chatelin, M.-H., Mousset, J., 1993. A decision support system based on farmers' knowledge to assess him in decision-making about work organization and long term evolution. *EurAgEng*, October 1-2 1993, Firenze (Italy).
- Aubertot, J. N., Barbier, J. M., Carpentier, A., Gril, J. J., Guichard, P., Lucas, P., Savary, S., Savini, I., and Voltz, M., 2005. "Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux. Rapport d'expertise collective." Inra et Cemagref (France).
- Aubry C., Biarnès A., Maxime F., Papy F., 1998a. Modélisation de l'organisation technique de la production dans l'exploitation agricole : la constitution de systèmes de culture. In : Dent B., Brossier J. (Ed.), Inra, Etudes et Recherches Syst. Agraires Dév., 31 : 25-43.
- Aubry, C., Papy, F., and Capillon, A., 1998b. Modelling decision-making process for annual crop management. *Agricultural Systems* 56, 45-65.
- Aujas P., Lacroix A., Lemarié S., Reau R., 2011. Réduire l'usage des pesticides. Un défi pour le conseil aux agriculteurs. *Economie rurale*, 324, 18-33.
- Auzet, A. V., Boiffin, J., and Ludwig, B., 1995. Concentrated flow erosion in cultivated catchment: influence of soil surface state. *Earth Surface Processes and Landforms* 20, 759-767.
- Becker H. S., 1988, *Les mondes de l'art*, Paris, Flammarion.
- Benjamin, L. R., & Park, S. E., 2007. The Conductance model of plant growth and competition in monoculture and species mixtures: a review. *Weed Research*, 47(4), 284-298.
- Berger P. L., Luckmann T., 1986, *La construction sociale de la réalité*, Paris, Méridiens Klincksieck.
- Biggs, R., Raudsepp-Hearne, C., Atkinson-Palombo C., Bohensky, E., Boyd, E., Cundill, G., Fox, H., Ingram, S., Kok, K., Spehar, S., Tengö, M., Timmer, D., Zurek, M., 2007. Linking Futures across Scales: a Dialog on Multiscale Scenarios. *Ecology and society*, 12(1), 16p.
- Bochet, E., 2007. Soil water availability effects on seed germination account or species segregation in semiarid roadslopes. *Plant Soil*, 295(1-2), 179-191.
- Bonnefoy A., 2013. Modélisation des pratiques agricoles en vue de l'évaluation des impacts hydrologiques de scénarios d'évolution des techniques d'entretien du sol dans un bassin versant méditerranéen, Mémoire de fin d'étude d'ingénieur, ENGEES, UMR LISAH, Montpellier, 64 pages et annexes.
- Bouvet L., Louchart X., Voltz, M. 2011. Towards operational models for water and pesticides fluxes at the catchment scale: model performance vs data quality. XIV Symposium in Pesticide Chemistry, Piacenza, Italie, 30 august – 1 septembre 2011.

- 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.
- Celette F., 2007. Dynamique des fonctionnements hydrique et azoté dans une vigne enherbée sous le climat méditerranéen. Thèse de doctorat, Montpellier SupAgro.
- Celette F., Findeling A., Gary C., 2009. Competition for nitrogen in an unfertilized intercropping system: The case of an association of grapevine and grass cover in a Mediterranean climate. *European Journal of Agronomy*, 30, 41-51.
- Celette F., Gaudin R., Gary C., 2008. Spatial and temporal changes to the water regime of a Mediterranean vineyard due to the adoption of cover cropping, *European Journal of Agronomy*, 29(4), 153-162.
- Celette F., Ripoche A., Gary C., 2010. WaLIS - A simple model to simulate water partitioning in a crop association: The example of an intercropped vineyard. *Agricultural Water Management*, 97(11), 1749-1759.
- Celette F., Wery J., Chantelot E., Celette J., Gary C., 2005. Belowground interactions in a vine (*Vitis vinifera* L.) - tall fescue (*Festuca arundinacea* Shreb.) intercropping system: water relations and growth. *Plant and Soil*, 276, 205-217.
- Cerdan, O., Le Bissonnais, Y., Souchère, V., Martin, P., and Lecomte, V., 2002. Sediment concentration in interrill flow: interactions between soil surface conditions, vegetation and rainfall. *Earth Surface Processes and Landforms* 27, 193-205.
- Cerf M., Omon B., Chantre E., Guillot M.N, LeBail M., Lamine C., Olry P., 2010. Vers des systèmes économes en intrants : quelles trajectoires et quel accompagnement pour les producteurs en grandes cultures? *Innovations agronomiques*, 8, 105-119.
- Chahinian, N., 2004. Paramétrisation multi-critère et multi-échelle d'un modèle hydrologique spatialisé de crue en milieu agricole. Thèse Doctorat Agro.M Montpellier.
- Chahinian, N., Moussa R., Andrieux, P., Voltz, M., 2005. Comparison of infiltration models to simulate flood events at the field scale. *Journal of Hydrology*, 306, 191-214.
- Chantelot E., Celette F., Wery J., 2004. Concurrence pour les ressources hydriques et azotées entre vigne et enherbement en milieu méditerranéen. Symposium « Quality management and viticulture », Stuttgart, 10-11mai 2004, H.R. Schultz ed., 171-184.
- Chantelot E., Gaudillère J-P., Kuntzmann P., Meyer E., Soyer J-P., 2002. L'enherbement permanent du vignoble en zone méditerranéenne et concurrence hydrique et azotée : constats et hypothèses. Document interne, ITV France.
- Chantre E., Cardona A., 2014. Trajectories of french field crop farmers moving toward sustainable farming practices: change, learning and links with the advisory services. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 38:5, 573-602.
- Chavassieux D., 2013. Reduction of water pollution from pesticides surface runoffs in viticulture : soil maintenance practices, dialogue networks and testing of normative backcasting scenarios. Mémoire ISARA Lyon.
- Chiffolleau Y., 2004, « Réseaux d'apprentissage et innovation dans une organisation productive. L'exemple d'un projet qualité en coopérative », *Recherches sociologiques*, 35, 3, p. 91-101.
- Chiffolleau Y., 2005, « Learning about Innovation Through Networks: The Development of Environment-Friendly Viticulture », *Technovation*, 25, 10, p. 1193-1204.
- Colbach N., Dürr C., Roger-Estrade J., Chauvel B., Caneill, 2006 – ALOMYSYS : Modelling black-grass (*Alopecurus myosuroides* Huds.) germination and emergence, in interaction with seed characteristics, tillage and soil climate. I., *Europ. J. Agronomy* 24, pp. 95-112.
- Colin, F., Moussa, R. and Louchart, X., 2012. Impact of the spatial arrangement of land management practices on surface runoff for small catchments. *Hydrological Processes*, 26, 255-271.
- Compagnone C., 2004. « Agriculture raisonnée et dynamique de changement en viticulture bourguignonne », *Recherches sociologiques*, 35, 3, 103-121.
- Compagnone C., 2010, Influence des dialogues professionnels sur les changements de pratiques des viticulteurs, *Le progrès Agricole et viticole*, 2 : 34-39.
- Compagnone C., 2014. « Les viticulteurs bourguignons et le respect de l'environnement. Réseaux de dialogues professionnels et dynamique de changements », *Revue française de sociologie*, 55, 2, p. 319-358.
- Compagnone C., Hellec F., 2009. Dynamique des changements et développement des pratiques respectueuses de l'environnement en grandes cultures. Etude comparative de trois réseaux d'agriculteurs de Bourgogne, XLVI^e Colloque de l'ASRDLF, Clermont-Ferrand les 6, 7 et 8 juillet 2009, 20 p.

- Corbane, C., Andrieux, P., Voltz, M., Chadœuf, J., Albergel, J., Robbez-Masson, J.M. 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: 79-90.
- Cothenet, M., Declercq, R. and Mahieu, M., 2012. Réalisation d'une base de données pour la proposition de scénarii de pratiques agricoles visant à améliorer la qualité des eaux de surface. Le bassin versant du Rieutort, Hérault. Montpellier SupAgro et UMR LISAH, 46 pages et fichiers en annexe.
- Coulouma, G., Boizard, H., Trotoux, G., Lagacherie, P., Richard, G. 2006. Effect of deep tillage for vineyard establishment on soil structure: A case study in Southern France. *Soil & Tillage Research*. 88. 132-143.
- Darré J.-P., 1991, « Des catégories aux configurations : les conditions d'analyse des processus d'inter-influence dans l'agriculture », *Économie rurale*, 201, p. 16-21.
- Darré J.-P., 1996, L'invention des pratiques dans l'agriculture : vulgarisation et production locale de connaissance, Paris, Karthala.
- Darré J.-P., Le Guen R., Lémerly B., 1989, « Changement technique et structure professionnelle locale en agriculture », *Économie rurale*, 192-193, p. 115-122.
- Degenne A., Forsé M., 1999. *Introducing Social Networks*. London: Sage Publications.
- Direction départementale des territoires et de la mer de l'Hérault, 2014. Notice d'information du territoire : « Mesures agroenvironnementales territorialisées (MAET). Territoire « LR_Rieu » - « Bassin versant du Rieutort et du Saint-Ouyres ». Campagne 2014, validée par la DDTM de l'Hérault le 28/03/2014, 8 pages.
- Duru, M., Papy, F., Soler, L. G., 1988. Le concept de modèle général et l'analyse du fonctionnement de l'exploitation agricole. *C. R. Acad. Agric. Fr.* 74, 81-91.
- Elhakeem, M. & Papanicolaou, A.N., 2009. Estimation of the Runoff Curve Number via Direct Rainfall Simulator Measurements in the State of Iowa, USA. *Water Resources Management*. Volume 23, 12, 2455-2473, DOI: 10.1007/s11269-008-9390-1.
- Fabre, J.; Louchart, X.; Moussa, R.; Dagès, C.; Colin, F.; Rabotin, M.; Raclot, D.; Lagacherie, P. & Voltz, M. 2010. OpenFLUID: a software environment for modelling fluxes in landscapes. In Fabre J.-C., Jaeger M., Louchart X., Muller J.-P. (Eds.) *LANDMOD2010 International conference on integrative landscape modelling*, Montpellier, France, February 3-5, 2010, 13 pages, www.symposcience.org.
- Garcia, L., 2013. Evaluation des conséquences hydriques et azotées de différents modes de gestion de parcelles viticoles sur la croissance de la vigne. Approche par l'expérimentation virtuelle. Cas de l'enherbement spontané dans le bassin versant du Rieutort. Projet SP3A – GESSOL. Mémoire d'Ingénieur Agronome, 2^e année, Montpellier SupAgro, UMR LISAH et UMR System, 70 pages et annexes.
- Garnier, P., Neel, C., Mary, B., & Lafolie, F., 2001. Evaluation of a nitrogen transport and transformation model in a bare soil. *European Journal of Soil Science*, 52(2), 253–268.
- Gary C., Payan J.C., Kansou K., Pellegrino A., Wery J., 2005. Un outil de diagnostic du vécu hydrique de parcelles viticoles, en relation avec des objectifs de rendement et de qualité. *Comptes-rendus/Proceedings GESCO 2005*, Geisenheim, 23-27 août 2005, 449-456.
- Giupponi, C., Eiselt, B., and Ghetti, P. F., 1999. A multicriteria approach for mapping risks of agricultural pollution for water resources: The Venice Lagoon watershed case study. *Journal of Environmental Management* 56, 259-269.
- Godet, M., 2000. The Art of Scenarios and Strategic Planning: Tools and Pitfalls. *Technological Forecasting and Social Change* 65, 3–22.
- Govers, G., Takken, I., and Helming, K., 2000. Soil roughness and overland flow. *Agronomie*, 20, 131-146.
- Granovetter M. S., 1973, « The Strength of Weak Ties », *American Journal of Sociology*, 78, 6, p. 1360-1380.
- Guilpart N. 2014. Relations entre services écosystémiques dans un agroécosystème à base de plantes pérennes : compromis entre rendement de la vigne et régulation de l'oïdium. in : Thèse de doctorat. Montpellier SupAgro, 27 février 2014. Montpellier. 180pp.
- Guilpart N., Metay A., Gary C., 2014. Grapevine bud fertility and number of berries per bunch are determined by water and nitrogen stress around flowering in the previous year. *European Journal of Agronomy*, 54 (Mar.), 9-20.
- 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.
- Hébrard, O., Voltz, M., Andrieux, P., and Moussa, R., 2006. Spatio-temporal distribution of soil surface moisture in a heterogeneously farmed Mediterranean catchment. *Journal of Hydrology* 329, 110-121.

- Hoang L. A., Castella J.-C., Novosad P., 2006. « Social Networks and information Access: Implications for Agricultural Extension in a Rice Farming Community in Northern Vietnam », *Agriculture and Human Values*, 23, 4, p. 513-527.
- Houdart M., Bonin M., Compagnone C., 2011. Social and spatial organisation - assessing the agroecological changes on farms: case study in a banana-growing area of Guadeloupe, *Int. J. Agricultural Resources, Governance and Ecology* 9 (1-2), 15-30
- Isaac M. E., Erickson B. H., Quashie-Sam S. J., Timmer V. R., 2007, « Transfer of Knowledge on Agroforestry Management Practices: The Structure of Farmer Advice Networks », *Ecology and Society*, 12, 2:[<http://www.ecologyandsociety.org/vol12/iss2/art32/>].
- Janeau, J. L., Bricquer, J. P., Planchon, O., and Valentin, C., 2003. Soil crusting and infiltration on steep slopes in northern Thailand. *European Journal of Soil Sc.* 54, 543-553.
- Jenks, G.F., 1967. "The Data Model Concept in Statistical Mapping", *International Yearbook of Cartography* 7: 186-190.
- Joannon, A., Papy, F., Martin, P., and Souchère, V., 2005. Planning work constraints within farms to reduce runoff at catchment level. *Agriculture Ecosystems & Environment* 111, 13–20.
- Joannon, A., Souchère, V., Martin, P., and Papy, F., 2006. Reducing runoff by managing crop location at the catchment level, considering agronomic constraints at farm level. *Land Degradation and Development* 17, 467–478.
- Johnson, K.A., Dana, G., Jordan, N.R., Draeger, K.J., Kapuscinski, A., Schmitt Olabisi, L.K., Reich P.B., 2012. Using Participatory Scenarios to Stimulate Social Learning for Collaborative Sustainable Development. *Ecology and society*, 17(2), 22p.
- Kazakou E., Violle C., Roumet C., Pintor C., Gimenez O., Garnier E., 2009. Litter quality and decomposability of species from a Mediterranean succession depend on leaf traits but not on nitrogen supply. *Annals of Botany* 104: 1151–1161.
- Kazakou, E., Garnier, E., Navas, M.-L., Roumet, C., Collin, C., & Laurent, G., 2007. Components of nutrient residence time and the leaf economics spectrum in species from Mediterranean old-fields differing in successional status. *Functional Ecology*, 21(2), 235–245.
- Kleyer, M., Bekker, R.M., Knevel, I.C., Bakker, J.P, Thompson, K., Sonnenschein, M., Poschlod, P., Van Groenendael, J.M., Klimes, L., Klimesová, J., Klotz, S., Rusch, G.M., Hermy, M., Adriaens, D., Boedeltje, G., Bossuyt, B., Dannemann, A., Endels, P., Götzenberger, L., Hodgson, J.G., Jackel, A-K., Kühn, I., Kunzmann, D., Ozinga, W.A., Römermann, C., Stadler, M., Schlegelmilch, J., Steendam, H.J., Tackenberg, O., Wilmann, B., Cornelissen, J.H.C., Eriksson, O., Garnier, E., Peco, B., 2008. The LEDA Traitbase: A database of life-history traits of Northwest European flora. *Journal of Ecology* 96: 1266-1274.
- Lagacherie, P. (coord.), 2004. "Dégradations physiques des sols de vigne et impacts sur la ressource en eau en milieu méditerranéen viticole. Rapport final du programme GESSOL." Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable - INRA.
- Lagacherie, P., Rabotin, M., Colin, F. Moussa, R, Voltz, M. 2010. Geo-MHYDAS: A landscape discretization tool for distributed hydrological modeling of cultivated areas. *Computers and Geosciences*, 36, 1021–1032.
- Lazega E., 1992, *The Micropolitics of Knowledge. Communication and Indirect Control in Workgroups*, New York (ny), Aldine de Gruyer.
- Le Bissonnais, Y. et Andrieux, P., 2007. Impact des modes d'entretien de la vigne sur le ruissellement, l'érosion et la structure des sols. *Progress Agricole et Viticole*, 124(10), 191-196.
- Lebon, E., Dumas, V., Pieri, P., Schultz, H.R., 2003. Modelling the seasonal dynamics of the soil water balance of vineyards. *Funct. Plant Biol.* 30, 699–710.
- Leenhardt, D., and Lemaire, P., 2002. Estimating the spatial and temporal distribution of sowing dates for regional water management. *Agricultural Water Management* 55, 37-52.
- Leenhardt, D., Therond, O., Cordier, M.O., Gascuel-Oudou, C., Reynaud, A., Durand, P., Bergez, J.E., Clavel, L., Masson, V., Moreau, P., 2012. A generic framework for scenarios exercises using models applied to water-resource management. *Environmental modelling and software*, 37,125-133.
- Lémery B., 2003, « Les agriculteurs dans la fabrique d'une nouvelle agriculture », *Sociologie du travail*, 46, 1, p. 9-25.
- Lennartz, B., Louchard, X., Voltz, M., and Andrieux, P., 1997. Diuron and simazine losses to runoff water in mediterranean vineyards. *Journal of Environmental Quality* 26, 1493-1502.
- Leonard, J., and Andrieux, P., 1998. Infiltration characteristics of soils in Mediterranean vineyards in Southern France. *Catena* 32, 209-223.

- Litzler, 1988. "Maîtrise de l'érosion en vignoble de coteaux. Aspects agronomiques." Ministère de l'Agriculture - Ministère de l'Environnement - ITV - Chambre d'Agriculture de Saône-et-Loire, 53p.
- Lopes C., Monteiro A., Rückert F.E., Gruber B., Steinberg B., Schultz H.R., 2004. Transpiration of grapevines and co-habiting cover crop and weed species in a vineyard. A "snapshot" at diurnal trends. *Vitis* 43 (2), 111-117.
- Louchart, X. and Voltz, M., 2007. Aging effects on the availability of herbicides to runoff transfer. *Environmental Science and Technology*, 41, 1137-1141. Doi: 10.1021/es061186q.
- Louchart, X., Coulouma, G., Voltz, M., Andrieux, P. 2001a. Study of the risk of contamination of surface water by oryzalin and quinoxifen in the Mediterranean vineyard region: Case of the Roujan catchment. INRA – Dow AgroSciences Convention, INRA, Montpellier.
- Louchart, X., Voltz, M., Andrieux, P. & Moussa, R. 2001b. Herbicide transport to surface waters at field and watershed scales in a Mediterranean vineyard area. *Journal of Environmental Quality*, 30, 982-991.
- Manoliadis, O. and Sachpazis, K., 2003. The role of terrain characteristics in flood management, Attica, Greece. *Journal of Environmental Hydrology*. Vol. 11, Papers 1-14, pp. 8.
- Martin-Clouaire R., Rellier J.-P., Paré N., Voltz M., Biarnès A. (Soumis 2013). Modelling management practices in viticulture taking resource limitations into account, *Environmental Modelling & Software*.
- Martin-Clouaire, R., Rellier J.-P., 2009. Modelling and simulating work practices in agriculture. *Int. J. of Metadata, Semantics and Ontologies* 4(1-2), 42-53.
- Martin-Clouaire, R., Rellier, J.-P., 2011. Fondements ontologiques des systèmes pilotés. Internal report MIAT-INRA (First version: 2001). http://carlit.toulouse.inra.fr/diese/docs/ri_ontologie.pdf
- Mary, B., Beaudoin, N., Justes, E., & Machet, J. M., 1999. Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soil using a simple dynamic model. *European Journal of Soil Science*, 50(4), 549–566.
- Metay A., Gary C., Casellas E., Kansou K., Ripoche A., Wery J., 2009. Modelling of cover cropped vineyards with APES, a modular simulation platform. In: M. van Ittersum, J. Wolf, G. van Laar (eds) *Proceedings of AgSAP Conference 2009 - Integrated Assessment of Agriculture and Sustainable Development, Setting the Agenda for Science and Policy*, Egmond aan Zee (The Netherlands), pp. 228-229.
- Mezière, D., Gary, C., Barbier, J. M., Rio, P., Bernos, L., Clément, C., Constant, N., Delière, L., Forget, D., Grosman, J., Molot, B., Sauvage, D., and Sentenac, G., 2009. "Ecophyto R&D, vers des systèmes de culture économes en produits phytosanitaires. Tome III, analyse comparative de différents systèmes en viticulture." MEEDDAT-MAP-INRA
- Mignolet, C., Schott, C., and Benoît, M., 2004. Spatial dynamics of agricultural practices on a basin territory: a retrospective study to simulate nitrate flow. The case of the Seine basin. *Agronomie* 24, 219-236.
- Monteiro A., Lopes M. C., 2007. Influence of cover crop on water use and performance of vineyard in Mediterranean Portugal. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 121, 336-342.
- Moussa, R., Voltz, M., and Andrieux, P., 2002. Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behavior of a farmed catchment during flood events. *Hydrol. Process.* 16, 393-412.
- 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.
- Nesrine, I., 2009. Evaluation de l'influence de l'état de surface du sol sur son infiltrabilité. Mémoire d'Ingénieur, INAT, Tunis, 64 pages.
- Papy, F., Attonaty, J.-M., Laporte, C., Soler, L.-G., 1988. Work organization simulation as a basis for farm management advice (equipment and manpower, levels against climatic variability), *Agricultural Systems* 27 (4), 295-314.
- Papy, F., 2001. Interdépendance des systèmes de culture dans l'exploitation. In "Modélisation des agro-écosystèmes et aide à la décision" (E. Malezieux, G. Trébuil and M. Jaeger, eds.), pp. 51-74. Editions Cirad-Inra.
- Paré, N., 2007. Etude de la variabilité et de la dynamique des états de surface des sols viticoles méditerranéens. Mémoire d'Ingénieur Agronome AgroParisTech., UMR LISAH Montpellier, 90 pp.
- Paré, N., 2011. 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. Thèse de doctorat, Montpellier SupAgro, France.
- Paré, N., Andrieux, P., Louchart, X., Biarnès, A., Voltz, M., 2011. Predicting the spatio-temporal dynamic of soil surface characteristics after tillage. *Soil & Tillage Research*, 114, 135–145, doi:10.1016/j.still.2011.04.003.

- Pellegrino A., Goze E., Lebon E., Wery J., 2006. A model-based diagnosis tool to evaluate the water stress experienced by grapevine in field sites. *European Journal of Agronomy* 25: 49-59.
- Pellegrino A., Lebon E., Simonneau T., Wery J., 2005. Towards a simple indicator of water stress in grapevine (*Vitis vinifera* L.) based on the differential sensitivities of vegetative growth components. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 11: 306-315
- Pellegrino A., Lebon E., Voltz M. and Wery J. 2004. Relationships between plant and soil water status in vine (*Vitis vinifera* L.). *Plant and Soil* 266: 129-142.
- Pellegrino, A., Lebon, E., Voltz, M., & Wery, J., 2004. Relationships between plant and soil water status in vine (*Vitis vinifera* L.). *Plant and Soil*, 266(1-2), 129–142.
- Rambal, S. & Cornet, A. 1982. Simulation de l'utilisation de l'eau et de la production végétale d'une phytocénose sahélienne du Sénégal. *Acta Oecol.Oecol.Plant.*, 3, 381-397
- Ramos M.C.,Martínez-Casasnovas J.A.,2010. Effects of precipitation patterns and temperature trends on soil water available for vineyards in a Mediterranean climate area. *Agricultural Water Management*, vol. 97, n°10, 1495-1505.
- Recous, S., Robin, D., Darwis, D., & Mary, B., 1995. Soil inorganic N availability: effect on maize residue decomposition. *Soil Biol. Biochem*, 27(12), 1529–1538.
- Reed, M.S., Kenter, J., Bonn, A., Broad, K., Burt, T.P., Fazey, I.R., Fraser, E.D.G., Hubacek, K., Nainggolan, D., Quinn, C.H., Stringer, L.C., Raverak, F., 2013. Participatory scenario development for environmental management: A methodological framework illustrated with experience from the UK uplands. *Journal of Environmental Management* 128, 345-362.
- Rémy J.C. et Marin-Lafèche A, INRA , Satation agronomique de l'Aisne, 1976. L'entretien organique des terres : coût d'un politique de l'humus- *Entreprise agricole*, novembre 1996, pp 63-67.
- Richard G. Allen, William O. Pruitt, James L. Wright, Terry A. Howell, Francesca Ventura, Richard Snyder, Daniel Itenfisu, Pasquale Steduto, Joaquin Berengena, Javier Baselga Yrisarry, Martin Smith, Luis S. Pereira, Dirk Raes, Alain Perrier, Isabel Alves, Ivan Walter, Ronald Elliott. 2006. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ET₀ by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agricultural Water management*, 81, 1-22.
- Ripoche A., Celette F., Cinna J.P., Gary C., 2010. Design of intercrop management plans to fulfil production and environmental objectives in vineyards. *European Journal of Agronomy*, 32, 30–39.
- Romero, P., Castro, G., Gomez J.A., 2007. Curve Number Values for Olive Orchards under different soil management. *Soil water management & conservation. SSSAJ*, volume 71: 6.
- Ruiz De Clavijo, E., 2005. The reproductive strategies of the heterocarpic annual *Calendula arvensis* (Asteraceae). *Acta Oecologica*, 28(2), 119–126.
- Sayre L., 2012. Pratiques d'entretien du sol et relations socio-techniques des viticulteurs sur le bassin versant du Rieutort. Rapport de recherche. Dijon, INRA.
- Schleip, I., Lattanzi, F. a., & Schnyder, H., 2013. Common leaf life span of co-dominant species in a continuously grazed temperate pasture. *Basic and Applied Ecology*, 14(1), 54–63.
- Simon S., Brun L., Guinaudeau J., Sauphanor B., 2011. Pesticide use in current and innovative apple orchard systems. *Agronomy for sustainable development*, 31, 541–555.
- Simon, C., 2006. Transformation de l'élevage et dynamiques des espaces ; revue de littérature sur les méthodes de scénarisation. Rapport du projet ANR-ADD « TRANS », 80 p.
- Sinclair, F., & Ludlow, M., 1986. Influence of soil water supply on the plant water balance for four tropical grain legumes. *Functional Plant Ecology*, 13(3), 329–341.
- Souchère, V., King, D., Daroussin, J., Papy, F., and Capillon, A., 1998. Effects of tillage on runoff directions: consequences on runoff contributing area within agricultural catchments. *Journal of Hydrology* 206, 256-267.
- Souchère, V., Millair, L., Echeverria, J., and Bousquet, F., 2009. Co-constructing with stakeholders a role-playing game to initiate collective management of erosive runoff risks at the watershed scale. *Environ. Model. Softw.*, doi:10.1016/j.envsoft.2009.03.002.
- Takken, I., Jetten, V., Govers, G., Nachtergaele, J., and Steegen, A., 2001. The effect of tillage-induced roughness on runoff and erosion patterns. *Geomorphology* 37, 1–14.
- Tindon Y., 2012. Spatialisation des risques de stress hydrique du vignoble en fonction des différents types d'entretien des sols : application au cas d'un bassin versant méditerranéen. Mémoire d'ingénieur agronome. Montpellier sup agro, IFV.

- Trambouze W., Voltz M., 2001. Measurement and modelling of the transpiration of a Mediterranean vineyard. *Agricultural and Forest Meteorology* 107: 153-166.
- Trambouze W., Andrieux, P., Coulouma, G., Zante, P. and Goma-Fortin, N., 2008. Importance des pratiques d'entretien des inter-rangs pour la protection des sols viticoles sensibles à l'érosion en climat méditerranéen. VIIème Congrès International des Terroirs viticoles, Nyon, Suisse. 19-23 mai 2008
- Trambouze, W. 1996. Bilan hydrique de la vigne à l'échelle de la parcelle: caractérisation et modélisation. Thèse de doctorat, Montpellier SupAgro, Montpellier.
- U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2007. Part 630 Hydrology National Engineering Handbook, Chapter 7, Hydrologic Soil Groups.
- U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2004. Chapter 10—Estimation of Direct Run off from Storm Rainfall. National Engineering Handbook, Washington, D.C., USA.
- Valdés-Gómez H., Celette F., García de Cortazar-Atauri I., Jara F., Ortega-Farías S., Gary C., 2009. Modelling soil water content and grapevine growth and development with the STICS crop-soil model under two different water management strategies. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 43, 13-28.
- Valdivieso F., Compagnone C, 2009, Changements de pratiques et réseaux de dialogues des viticulteurs du bassin versant de la Peyne, Rapport final volet sociologique projet ANR GeDuQuE, INRA, 60 p.
- Valente T. W., Fujimoto K., 2010, "Bridging: Locating Crucial Connectors in a Network." *Social Networks* 32: 212-220.
- van Genuchten, M. Th., F. J. Leij, and S. R. Yates, 1991. Logiciel RETC.
- Van Keulen, H., 1975. Simulation of water use and herbage growth in arid regions. Pudoc, Wageningen,
- van Notten, P.W.F., Rotmans, J., van Asselt M.B.A., Rothman, D.S., 2003. An updated scenario typology. *Futures* 35 (2003) 423-443.
- Vile, D., 2005. Significations fonctionnelle et écologique des traits des espèces végétales : exemple dans une succession post-culturale méditerranéenne et généralisations. Université Montpellier II (France) & Université de Sherbrooke(Qc,Canada). 138 pages. Thèse. Soutenue le 02 décembre 2005.
- Wellman B., 2007, "Challenges in Collecting Personal Network Data: The Nature of Personal Network Analysis", *Field Method*, 19, p. 111-115.
- Wermelinger, B. (1991). Nitrogen Dynamics in Grapevine : Physiology and Modeling. *Proceedings of the International Symposium on Nitrogen in Grapes and Wine*, 23-31.
- White K., Watkins S. C., 2000, « Accuracy, Stability and Reciprocity in Informal Conversational Network in Rural Kenya », *Social Networks*, 22, 4, p. 337-355.
- Wiles, L., King, R., Schweizer, E., Lybecker, D., and Swinton, S., 1996. GWM : general weed management model. *Agricultural Systems*, 50(4) :355-376.
- Wilkinson, A., Eidinow, E., 2008. Evolving practices in environmental scenarios: a new scenario typology. *Environ. Res. Lett.*, 3, 11p.
- Wilson, I., 2000. From Scenario Thinking to Strategic Action. *Technological Forecasting and Social Change* 65, 23-29.
- Zarifian Ph., 1996, Travail et communication. Essai sociologique sur le travail dans la grande entreprise industrielle, Paris, Presses universitaires de France.

Liste des figures et tableaux

Figure 1 : Démarche générale.....	6
Figure 2 : Détail de la démarche et plan du rapport.....	7
Figure 3: Localisation du bassin versant du Rieutort	14
Figure 4: Occupation du sol et réseau hydrographique	15
Figure 5: Distribution des sols dans le bassin versant du Rieutort	16
Figure 6: Consommations en eau de la vigne et de l'enherbement simulées par le modèle de bilan hydrique (climat méditerranéen, année 2004)	18
Figure 7: Impact de la profondeur de sol sur le niveau de concurrence de l'enherbement (Syrah, Languedoc-Roussillon). Source : CA34	19
Figure 8: Cartographie des différents types de sol identifiés pour le paramétrage de WaLIS.....	22
Figure 9 : Nombre de jours de stress annuel moyen en fonction des périodes du cycle de la vigne par type de sol et par pratique culturale	24
Figure 10: Cartographies d'aptitude pour le travail du sol intégral et pour un enherbement permanent sur 60% de la surface.....	25
Figure 11: Nombre de jours de stress (NBJSstress) en fonction de la réserve utile par modalité d'entretien du sol	26
Figure 12: Évolution des classes de risque des sols en fonction des itinéraires techniques adoptés..	26
Figure 13: Répartition des exploitations et de la SAU par classe de superficie dans les communes de Murviel-lès-Béziers, Cabrerolles, St Nazaire de Ladarez et Causses-et-Veyran	28
Figure 14: Distribution des classes de taille des parcelles de vigne dans le bassin du Rieutort.....	29
Figure 15: liens dialogiques entre les viticulteurs du BV	39
Figure 16: schéma général décrivant les chaines de modèles utilisés pour l'évaluation des stratégies candidates	42
Figure 17: Un système de production viticole	44
Figure 18: Exemple de plan d'activités.....	48
Figure 19: Calendrier des chantiers pour le cycle 2006-2007.....	57
Figure 20 : trajectoire d'évolution des EdS : 20a : évolution des EdS sur sols travaillés ; 20b : EdS des sols désherbés chimiquement ; 20c : EdS des sols avec un enherbement, issu de la croissance d'une végétation herbacée spontanée. Les différents EdS et leurs propriétés d'infiltration sont présentés en annexe (A1 et A2). T : EdS après travail du sol, TCst : EdS après travail et apparition d'une fine croûte ; VCst : EdS avec un recouvrement de végétation herbacée de plus de 50% ; Cst : sol nu avec croûte structurale consolidée.	59
Figure 21: Les trois stades d'évolution des états de surface du sol après travail du sol. Les figurés en gris foncé représentent les cailloux et graviers. Les figurés en autres couleurs symbolisent les mottes. L'ombre grisée dessinée entre les mottes indique l'apparition et l'extension de la croûte structurale.....	60
Figure 22: Démarche d'estimation de la perte de rendement viticole, sur cinq parcelle types pour les neuf climats types, à l'échelle du bassin versant. En ovale, figurent les simulateurs.....	65

Figure 23: Représentation du bilan hydrique sur vigne enherbée. Le compartiment 1 est dédié aux racines de l’herbe et de la vigne, le compartiment 2 n’est accessible qu’aux racines de la vigne. ASW_{ic} et ASW_v représentent l’eau disponible pour l’herbe et la vigne, respectivement ; Dic : drainage d’eau du compartiment 1 vers le compartiment 2 ; D : pertes d’eau par drainage ; T_v : transpiration de la vigne ; ET_{aic} : évapotranspiration du couvert végétal ; E_s : évaporation du sol nu ; LA_{ic} : LAI du couvert ; K_v : Coefficient d’interception lumineuse de la vigne ; S_{surf} : état de surface du sol jouant sur le ruissellement (Runoff) ; P : précipitations ; p_{ic} : proportion de sols enherbée. *Source : Celette et al., 2010* 65

Figure 24 : Croissance du S_i (LAI, Leaf Area Ratio) de j=20 à j=29 en climat « SS » 68

Figure 25: Évaluation environnementale des stratégies normatives..... 72

Figure 26: Schéma conceptuel de la modélisation biophysique. En carré vert les simulateurs, en ovales jaunes les variables, en ovale bleu le résultat, en rond vert, bleu et violet les 3 parties distinguables du modèle. Dans cette figure, les noms des simulateurs ont été choisis pour être explicites mais ne correspondent pas aux noms des simulateurs proposés sur la plateforme OpenFLUID. Les noms officiels des simulateurs sont dans le tableau en annexe A3 74

Figure 27: Cumuls de pluie annuelle (en mm) sur la période automne/hiver de 1992 à 2013. Le 1er quartile est représenté en jaune, la médiane en bleu et le 3ème quartile en vert. 79

Figure 28: Répartition spatiale des modalités d'entretien du sol dans les parcelles en vigne du bassin versant du Rieutort, pour la stratégie 1b (cf. Tableau 21)..... 83

Figure 29: Mosaïque parcellaire semi-virtuelle du territoire des exploitations du bassin versant du Rieutort..... 85

Figure 30: Exemples de calendrier de désherbage chimique (stratégie 2b, climats MH)..... 88

Figure 31: Histogramme du nombre de travaux du sol simulés pour la stratégie 2b selon le climat de la saison printemps/été (en nombre de parcelles concernées sur le bassin versant)..... 89

Figure 32: Calendriers de travail du sol à l'échelle du bassin versant pour les printemps/été sec, moyen et humide (stratégie 2b) 90

Figure 33: Impact de la date du premier travail du sol sur le nombre de passages (stratégie 2b, climat Moyen/Moyen)..... 90

Figure 34: Calendrier de travaux de sol pour les stratégies 1a et 2b (climat Moyen/Moyen) 91

Figure 35: Dynamique spatio-temporelle des opérations de travail du sol à l'échelle du bassin versant (stratégie 2b, climat Moyen/Sec)..... 92

Figure 36: Carte du bassin versant : types de sols et pratiques de gestion du sol dans certaines parcelles de vigne (enquête de Diane Chavassieux, UMR Innovation, juin 2013). L : labour, D : disques ; GB : girobroyeur ; Enh : enherbement ; pré/post : désherbage chimique en pré/post-levée ; tâches : désherbage chimique en tâches. Auteur : Léo GARCIA, 2013 94

Figure 38: FTSW de la vigne, simulée du débourrement au 31/08. En vert: climat SS ; en rose : climat MM ; en bleu : climat HH..... 101

Figure 39: FTSW de la vigne, simulée du débourrement au 31/08. En vert clair: climat SM ; en rose : climat HS ; en bleu : climat HM ; en jaune : climat SH ; en rouge : climat MS et en vert foncé : climat MH. 102

Figure 43: Classes de FTSW optimales en fonction de la phénologie de la vigne (Pellegrino et al., 2006) 112

Figure 44: Evolution de la FTSW des 5 parcelles, du débourrement à la floraison, pour les climats « SS », « MM » et « HH ». En rouge : parcelle RT052_35 ; en vert : parcelle RT067_22 ; en violet : parcelle RT033_20 ; en orange : parcelle RT075_38 ; en bleu : parcelle RT054_1. Les polygones gris représentent respectivement les périodes « Débourrement-Floraison », « Floraison-

Fermeture de la grappe », « Fermeture-Véraison » et « Véraison-Récolte », les classes optimales de FTSW définies par Pellegrino et al. (2006) sont indiquées dans chaque polygone. 113

Figure 45: Du rendement potentiel au rendement final : l'évolution du maximum comme un indicateur de pilotage du rendement de la vigne (d'après Guilpart, 2014). 115

Figure 46: Schéma des connectivités entre SU de la zone proche de l'exutoire du Rieutort 119

Figure 47: Exemple d'évolutions simulées a) de la couverture végétale (en vert) et b) de la conductivité hydraulique du sol (en noir) sous le rang pour une parcelle simulée subissant 3 labours (traits rouges). 124

Figure 48: Exemple d'évolutions simulées durant une année des concentrations en herbicide à l'exutoire du bassin du Rieutort pour les 4 stratégies normatives testées. 125

Tableau 1 : Les stratégies candidates retenues 11

Tableau 2: Capacité d'infiltration des eaux de pluies selon l'état de surface du sol (Andrieux, 2006) . 17

Tableau 3: Les différentes modalités étudiées 20

Tableau 4: Valeurs de CN utilisées dans le paramétrage de WaLIS 21

Tableau 5 : Série climatique utilisée 23

Tableau 6 : Seuils de contrainte hydrique et conséquences agronomiques (Pellegrino et al., 2006) .. 23

Tableau 7 : Définition des classes de risques 25

Tableau 8: la position des viticulteurs dans le réseau 40

Tableau 9 : Les caractéristiques des chantiers dans l'exploitation chez MG11 54

Tableau 10: Valeurs des prédicats d'ouverture et de fermeture des chantiers pour l'exploitation MG11 55

Tableau 11: Comparaison des dates observées et simulées de travail du sol sur la parcelle Roujan en hiver et au printemps 56

Tableau 12: Enherbement type constitué de 5 espèces représentatives d'un couvert spontané en période automne/hiver 61

Tableau 13: Enherbement type constitué de 5 espèces représentatives d'un couvert spontané en période printemps/été 62

Tableau 14: Paramètres des enherbements types. Tg : température de germination ; Tb : température de base ; $\theta(\psi_{min})$: humidité du sol minimale pour germination ; θ_{ht} : temps hydrothermal ; ψ_{min} : potentiel hydrique du sol minimal pour germination ; RGR : relative growth rate (taux de croissance relatif) ; LAR : leaf area ratio. 62

Tableau 15: Paramètres WaLIS propres à l'enherbement 66

Tableau 16: Résumé des valeurs de LLS trouvées dans la bibliographie. La valeur trouvée dans l'article de Shleip est une moyenne (réalisée par l'auteur) sur plusieurs espèces prairiales aux LLS proches. 68

Tableau 17: Valeurs de LDMC des espèces constituant l'enherbement type 69

Tableau 18: TTSW totale calculée pour chaque parcelle simulée. 70

Tableau 19: TTSW de l'herbe et de la vigne pour chaque parcelle simulée, en fonction de la proportion enherbée de la parcelle. Sur fond vert : TTSW de l'herbe (TTSWh) ; sur fond blanc : TTSW de la vigne (TTSWv) ; p : proportion enherbée. 70

Tableau 20: Diversité des climats simulés en termes de cumuls de précipitations, et années sélectionnées pour la représentation des saisons.	80
Tableau 21: Les modalités d'entretien du sol modélisables.....	81
Tableau 22: Table de correspondance entre les modalités d'entretien du sol associées et les modalités évaluées par rapport aux risques de stress hydrique.....	82
Tableau 23: Niveau d'acceptabilité des modalités d'entretien du sol selon la classe de risque.....	82
Tableau 24: Superficie relative de chaque technique à l'échelle du bassin versant selon la stratégie	84
Tableau 25: Les caractéristiques des chantiers modélisés.....	87
Tableau 26: Valeurs des conditions d'ouverture et de fermeture des chantiers.....	87
Tableau 27: Présentation des parcelles de la simulation (code parcelle, type de sol et modalité d'entretien du sol affecté à la parcelle selon les stratégies).	95
Tableau 28: Indicateurs de précision calculés en comparant les deux stratégies. La stratégie « observée » est la stratégie 1a, la « prédite » est la stratégie 2a. N : nombre d'observations ; Moyenne obs/pred : moyenne des valeurs « observées » (1a)/prédites (2a) ; E-type obs/pred : écart-type de la distribution des valeurs en 1a/2a ; MSE : mean squared error ; RMSE : root mean squared error ; RRMSE : relative root mean squared error.	96
Tableau 29: Cumul des ETRh de l'ensemble des simulations de la stratégie 1a par ordre de décroissant de valeurs. En vert : parcelles enherbées sur tous les IR; en vert clair : parcelles enherbées un IR sur deux; en marron : parcelles travaillées.	105
Tableau 30: Entrées d'azote dans le système. K2 : coefficient de minéralisation annuelle.....	107
Tableau 31: Exportations d'azote du système, pour les différentes situations simulées.....	108
Tableau 32: Comparaison du coefficient de minéralisation annuel K2 avec des coefficients recalculés, en prenant compte des facteurs de température et d'humidité. K2 : coefficient de minéralisation annuel; Mn : coefficient de minéralisation recalculé, f(T) : facteur de température, f(θ) : facteur d'humidité.	110
Tableau 33: Correspondance entre stades physiologiques de la vigne et nombre de jours correspondants dans la simulation.....	113
Tableau 34: FTSW moyen à la floraison pour les différentes parcelles suivant les années climatiques et facteur de réduction du rendement associé.....	116
Tableau 35: Synthèse des effets des modalités d'entretien du sol sur les rendements en considérant 3 années types (année humide, année moyenne et année sèche).....	117
Tableau 36: Valeurs estimées de K_s pour chaque horizon des sols du Rieutort (en m/s). Les numéros de sols indiqués sont les mêmes que ceux utilisés dans la figure 5 qui présente la typologie de sol établie.	121
Tableau 37: Valeur estimée de la densité apparente du sol en fonction de la nature de l'horizon et du taux de cailloux. Horizon 1 : 0-20 cm, Horizon 2 : 20-60 cm et Horizon 3 : > 60 cm.....	121
Tableau 38: Valeurs observées du ruissellement de surface aux échelles de la parcelle et d'un bassin versant de 91 ha en milieu viticole méditerranéen (Louchart et al., 2001a).....	122
Tableau 39: Valeurs simulées des concentrations maximales annuelles et des pertes cumulées en pesticides à l'exutoire du bassin du Rieutort selon les 4 stratégies normatives.....	123

Table des matières

Introduction

Contexte	2
Positionnement général	2
Etats des connaissances et enjeux scientifiques	3
Evaluation de l'effet des pratiques sur les risques de ruissellement polluant.....	3
Evaluation des contraintes à la mise en œuvre des pratiques	4
Risques de pertes de rendement liés à des stress hydrique et azoté.....	4
Acceptabilité individuelle et collective des pratiques.....	5
Objectifs, démarche et plan du rapport	6

Partie 1: Identification de stratégies de réduction des risques de ruissellement polluant

1 Méthodes.....	9
2 Résultats	10
2.1 Analyse réflexive sur la démarche utilisée et les résultats obtenus	10
2.2 Les stratégies candidates : principes d'élaboration, stratégies et pratiques alternatives, justifications et limites	11

Partie 2: Caractérisation et état des lieux d'un bassin versant viticole à enjeux : le bassin versant du Rieutort

Introduction	14
1 Le milieu physique et l'occupation du sol.....	14
1.1 Principales caractéristiques du milieu	14
1.2 Contraintes hydriques et limitations des choix d'entretien du sol : Etude préalable	16
1.2.1 Modalités d'entretien des sols et disponibilité en eau des sols pour la vigne	17
1.2.1.1 Les modalités d'entretien des sols influent sur la dynamique de l'eau dans le sol.....	17
1.2.1.2 Le type de sols peut atténuer ou aggraver les risques de contrainte hydrique pour la vigne	18
1.2.2 L'analyse du risque de contrainte hydrique suivant les sols et les modalités d'entretien du sol	19
1.2.2.1 Le paramétrage du modèle de bilan hydrique	20
1.2.2.2 Choix d'un indicateur synthétique de risque	23
1.2.3 Spatialisation du risque de contrainte à l'échelle du BV.....	24
1.2.3.1 Méthodologie de production des cartographies de risque sur le BV	24
1.2.3.2 Analyse des résultats et conséquences pour le raisonnement des pratiques culturales	26
1.2.4 Discussion et conclusions.....	27

1.2.4.1	Des cartographies qui prennent en compte le milieu physique	27
1.2.4.2	Conclusions.....	28
2	Caractéristiques socio techniques	28
2.1	Les structures d'exploitation et le parcellaire cultural viticole.....	28
2.2	Etat des lieux des pratiques actuelles	29
2.2.1	Méthodes	29
2.2.2	Résultats	30
2.2.2.1	Caractéristiques des exploitations agricoles enquêtées	30
2.2.2.2	Les pratiques courantes d'entretien des sols.....	31
2.2.2.3	Relations entre pratiques, types de sol et caractéristiques des exploitations	35
2.3	Etat des lieux du réseau de pairs – Les réseaux de dialogues.....	35
2.3.1	Méthode	36
2.3.2	Résultats	36
2.3.2.1	L'origine des liens.....	36
2.3.2.2	La circulation de l'information.....	37
2.3.2.3	Cas exemplaires.....	37
2.3.2.4	Le réseau complet.....	38
2.3.2.5	Types de position dans le réseau	40
2.3.2.6	Liens entre le type de position et le type de pratiques.....	41
2.3.2.7	Conclusion.....	41

Partie 3: Construction de modèles pour l'évaluation des stratégies candidates

1	Introduction.....	42
2	Simuler les itinéraires techniques résultants de la mise en œuvre de choix techniques et organisationnels dans une exploitation agricole	43
2.1	Concepts généraux	43
2.2	Le modèle structurel : la représentation du système de production viticole	45
2.2.1	Le système piloté	45
2.2.2	Le système opérant	45
2.2.3	Le système décisionnel.....	46
2.2.3.1	La notion de chantier.....	46
2.2.3.2	La stratégie de conduite.....	48
2.2.3.3	Organisations particulières de certains chantiers	48
2.3	Initialisation et lancement d'une simulation	49
2.3.1	Description de l'état initial du système simulé	49
2.3.1.1	Un ensemble d'instances de classes	49
2.3.1.2	Un ensemble de paramètres.....	50
2.3.1.3	Un ensemble de fichiers en entrée	50

2.3.2	Lancement et entretien de la dynamique du système	51
2.3.2.1	L'agenda d'évènements	51
2.3.2.2	Dynamique du système biophysique	51
2.3.2.3	La dynamique du système opérant.....	52
2.3.2.4	Le fonctionnement algorithmique du système décisionnel	52
2.4	Application au cas d'une exploitation de la plaine viticole Héraultaise	53
2.4.1	Le cas d'étude et sa paramétrisation.....	53
2.4.2	Expérimentation et résultats	55
2.4.3	Discussion sur les résultats	57
2.5	Discussion générale	57
3	Modélisation des impacts des itinéraires techniques.....	58
3.1	Impact des itinéraires techniques sur les évolutions des états de surface à l'échelle de la parcelle.....	58
3.1.1	Les états de surface et leurs trajectoires d'évolution.....	58
3.1.2	Evolution des états de surface des sols travaillés : un modèle original de formation d'une croûte	60
3.1.3	Evolution des états de surface des sols désherbés chimiquement.....	60
3.1.4	Evolution des états de surface des sols enherbés. Un modèle de dynamique d'installation, de développement et de sénescence d'une végétation herbacée.....	61
3.1.4.1	Description de la trajectoire d'évolution des EdS en situation d'enherbement.....	61
3.1.4.2	Enherbement-type et modèle de croissance de l'herbe sous OpenFLUID	61
3.1.4.3	Le modèle de croissance de l'herbe sous OpenFLUID	63
3.2	Impact des itinéraires techniques sur le fonctionnement hydrique et azoté de la parcelle agricole et rendements associés	64
3.2.1	Démarche de modélisation	64
3.2.2	Présentation du modèle WaLIS	65
3.2.3	Calcul des paramètres de l'enherbement pour WaLIS.....	66
3.2.3.1	LAI rate ou taux de croissance du LAI	66
3.2.3.2	LLSmin ou Leaf Lifespan	68
3.2.3.3	Seuils de FTSW	68
3.2.3.4	Adaptation du modèle WaLIS	69
3.2.3.5	Types de sols et réserves hydriques.....	70
3.2.4	Bilan azoté simplifié des parcelles.....	70
3.2.4.1	Coefficient de minéralisation potentielle	70
3.2.4.2	Exportations d'azote.....	71
3.2.4.3	Fertilisation	71
3.2.4.4	Pondération de la minéralisation par l'humidité du sol.....	71
3.2.4.5	Estimation de la compétition directe – Croissance du LAI.....	72
3.3	Impact des itinéraires techniques sur les flux à l'échelle du BV.....	72
3.3.1	Démarche	72

3.3.2	La modélisation biophysique développée.....	73
3.3.2.1	Caractéristiques générales	73
3.3.2.2	L'organisation de la modélisation et ses différentes parties	73

Partie 4: Mise en œuvre des évaluations sur le bassin versant du Rieutort

1	Introduction.....	79
2	Évaluation des stratégies normatives par modélisation.....	79
2.1	Définition de climats tests types	79
2.2	Spatialisation des modalités d'entretien du sol à la résolution parcellaire pour chaque stratégie candidate.....	80
2.2.1	Les modalités d'entretien du sol modélisables pour chaque stratégie	80
2.2.2	La démarche de spatialisation des modalités d'entretien du sol	81
2.2.3	Les cartes de distribution des modalités d'entretien du sol.....	83
2.3	Simulation des itinéraires techniques résultant de la mise en œuvre des stratégies candidates à l'échelle du bassin versant.....	84
2.3.1	Paramétrage du modèle Dhivine	84
2.3.1.1	La description du vignoble des exploitations	84
2.3.1.2	La description du matériel et de la main d'œuvre de chaque exploitation.....	86
2.3.1.3	La stratégie de conduite du vignoble	86
2.3.2	Les simulations effectuées	88
2.3.3	Principaux résultats.....	88
2.3.3.1	Variabilité des calendriers de désherbage chimique et de travail du sol	88
2.3.3.2	Dynamiques spatio-temporelles des opérations d'entretien du sol à l'échelle du bassin versant	91
2.3.4	Intérêts et limites de l'approche	92
2.4	Distribution des rendements en fonction des modalités d'entretien des sols (en fonction des 5 types de sol à l'échelle du bassin versant)	93
2.4.1	Caractérisation des parcelles d'étude dans le bassin versant	93
2.4.1.1	Sélection des parcelles	93
2.4.1.2	Caractérisation hydrique des parcelles : calcul des TTSW	96
2.4.2	Résultats	96
2.4.2.1	Distribution des stress hydriques	96
2.4.2.2	Distribution des stress azotés	107
2.4.2.3	Conséquences des stress hydriques et azotés en terme de perte de rendement ...	111
2.4.3	Discussion - Conclusion.....	118
2.5	Evaluation des flux de ruissellement d'eau et de pesticides à l'échelle du bassin versant pour chaque stratégie	118
2.5.1	Paramétrage de la modélisation	118
2.5.1.1	Paramètres globaux	118
2.5.1.2	Paramétrage du bilan hydrique	120

2.5.1.3	Paramétrage de la partie hydrologique	122
2.5.2	Résultats	123
2.5.2.1	Pression phytosanitaire	123
2.5.2.2	Volume ruisselé	124
2.5.2.3	Pertes et concentrations en pesticides à l'exutoire du bassin versant	125
2.5.3	Synthèse et discussion	126
3	Acceptabilité des stratégies candidates	127
3.1	Evolutions envisagées par les viticulteurs	127
3.1.1	Méthodes	127
3.1.2	Résultats	128
3.1.2.1	Indicateurs de propension des agriculteurs à modifier les pratiques d'entretien des sols	128
3.1.2.2	Les logiques de changement au niveau individuel	129
3.1.2.3	Les logiques collectives de changement	130

Partie 5: Synthèse et conclusion générale

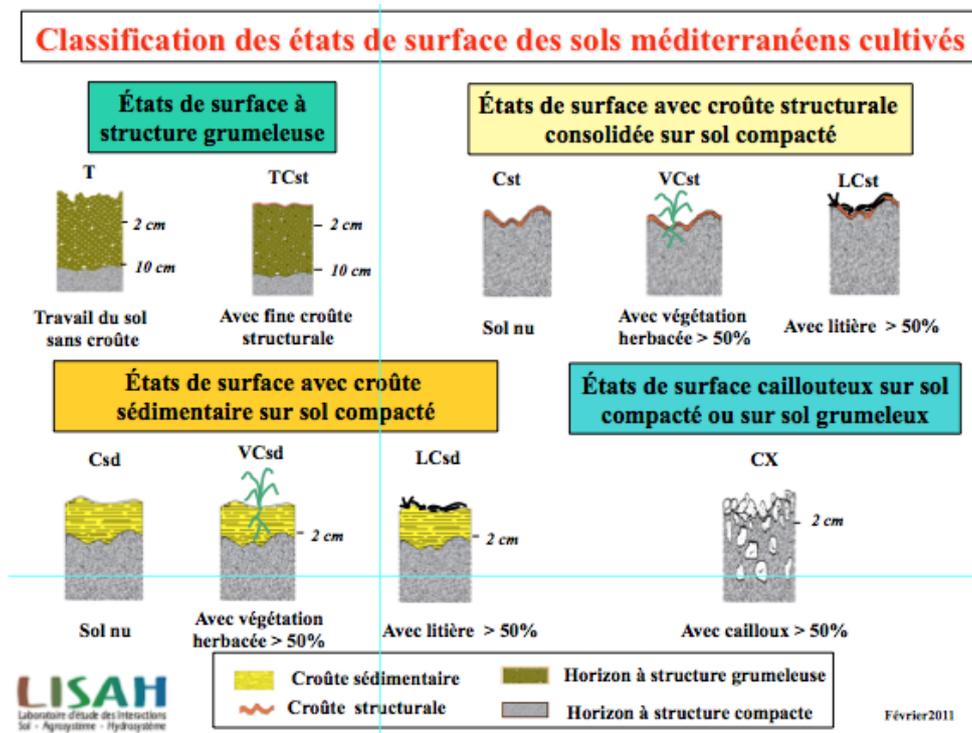
1	Les stratégies candidates et leurs déclinaisons en modalités d'entretien du sol spatialement réparties au sein du bassin versant	133
2	L'évaluation par modélisation	134
2.1	Une chaîne de modèles pour évaluer les impacts productifs et environnementaux des stratégies	134
2.1.1	Un modèle pour simuler les itinéraires technique dans chacune des parcelles en vigne du bassin	134
2.1.2	Des modèles d'évolution des états de surface et du couvert herbacé	135
2.1.3	Des modèles de simulation des stress hydrique et azoté pour estimer le rendement ...	136
2.1.4	Un modèle hydrologique distribué pour simuler le ruissellement polluant	136
2.2	Les résultats de l'évaluation par modèle	137
2.2.1	Les itinéraires techniques simulés	137
2.2.2	L'évaluation des bilans hydriques et azotés et de leurs conséquences sur le rendement	137
2.2.3	L'évaluation des impacts environnementaux	139
2.3	Bilan de l'évaluation par modélisation	140
2.3.1	Les performances productives et environnementales des stratégies	140
2.3.2	La chaîne de modélisation	141
3	L'évaluation à dire d'acteurs	142
3.1	Les logiques de changement au niveau individuel	142
3.2	Les logiques collectives de changement	143
4	Conclusion	144

Références bibliographiques	146
-----------------------------	-----

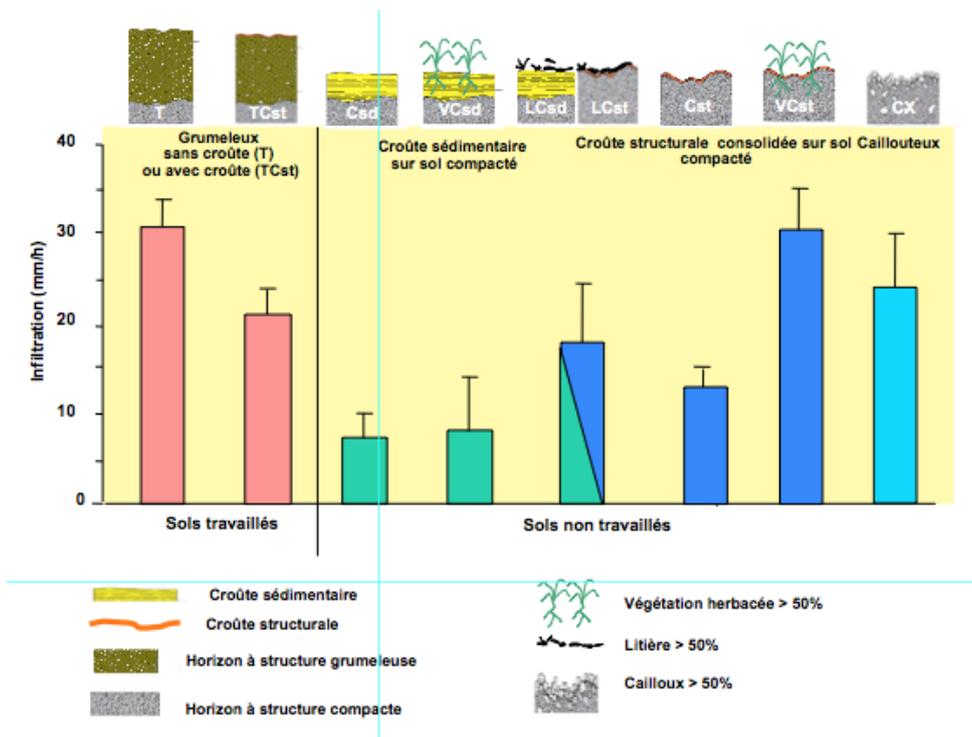
Liste des figures et tableaux - Table des matières - Annexes	
--------------------------------------------------------------	--

Annexes

A1. Typologie des états de surface (EdS)



A2. Infiltrabilité des états de surface mesurées avec un infiltromètre à aspersion sur des placettes de 1 m²



A3. Correspondance entre noms des simulateurs décrits dans la figure 25 (plate-forme OpenFLUID).

Dans le schéma conceptuel	Dans la plate-forme Openfluid
LAI	Plant.canopy.lai-growth.empirical
Energie cinétique	Energy.surf.rainfall-kinetic.zanchi-torri
Dynamique de formation d'une croûte structurale	Soil.surf.SSC-evolution.logistic-regression
Germination	plant.surf.weeds-germination.hydrothermal-time
Croissance de l'herbe	plant.surf.weeds-growth.conductance
Lecture des propriétés du sol	soil.uz.distri-properties.stratum-segmentation
Partage infiltration / ruissellement	water.surf-uz.distri-runoff-infiltration.diskin
Redistribution entre les couches de sol	water.uz-sz.distri-redistribution-layer.gravity-drainage
Evaporation	water.atm-surf.distri-evaporation.van-keulen
Transpiration	water.atm-plant.distri-transpiration.threshold
	Water-surf-transfer-rs-hayamai-1-7
	Water-surf-transfer-su-hayamai-1-7
Transfert eau et pesticides	pop.plant-surf.application-partition.lai-beer-lambert
	pop.surf.transfer-su.hayami
	pop.surf.transfer-rs.hayami

Une documentation est disponible en ligne pour chacun des simulateurs sauf pour le simulateur 'Croissance'.

Documentation en ligne : <http://www.umr-lisah.fr/repos2web/>

A4. Estimation de la densité apparente des horizons des 5 principaux types de sols du BV.

Densités apparentes des 5 classes de Sols					
horizon\sols	S1	S2	S3	S4	S5
H1	1,5	1,5	1,5	1,4	1,5
H2	1,5	1,6	1,5	1,6	1,6
H3	1,6	1,6	1,6	1,7	1,7

A5. Teneurs en eau résiduelles et à saturation estimées par le logiciel RETC (van Genuchten et al., 1991) pour les différents horizons des sols du bassin versant du Rieutort.

Horizon	Texture (%)			Teneur en eau résiduelle (%)	Teneur en eau à saturation (%)
	sable	limons	argile		
Sol1_H1	78	0	22	6,76E-02	4,23E-01
Sol1_H2	79	0	21	6,50E-02	4,23E-01
Sol1_H3	81	0	19	6,24E-02	3,85E-01
Sol2_H1	78	0	22	7,01E-02	4,23E-01
Sol2_H2	78	0	22	7,16E-02	3,85E-01
Sol2_H3	78	0	22	7,16E-02	3,85E-01
Sol3_H1	78	0	22	6,51E-02	4,23E-01
Sol3_H2	64	0	36	8,56E-02	4,23E-01
Sol3_H3	64	0	36	8,56E-02	3,85E-01
Sol4_H1	87	0	13	4,71E-02	4,62E-01
Sol4_H2	69	0	31	7,78E-02	3,85E-01
Sol4_H3	74	0	26	7,11E-02	3,46E-01
Sol5_H1	85	0	15	5,23E-02	4,23E-01
Sol5_H2	81	0	19	6,02E-02	3,85E-01
Sol5_H3	79	0	21	6,33E-02	3,46E-01

Production issue du projet SP3A

Publications scientifiques parues

- Gaudin, R. and Gary C., 2012. Model-based evaluation of irrigation needs in Mediterranean vineyards. *Irrigation Science*, 30(5), 49-459, doi : 10.1007/s00271-012-0349-x.
- Guilpart N., Metay A., Gary C., 2014. Grapevine bud fertility and number of berries per bunch are determined by water and nitrogen stress around flowering in the previous year. *European Journal of Agronomy*, 54 (Mar.), 9-20, doi : 10.1016/j.eja.2013.11.002
- Pare, N., Andrieux, P., Louchart, X., Biarnes, A., Voltz, M., 2011. Predicting the spatio-temporal dynamic of soil surface characteristics after tillage. *Soil & Tillage Research*, 114, 135–145, doi:10.1016/j.still.2011.04.003. (*partiellement issue du projet SP3A*).

Publications scientifiques à paraître

Publications scientifiques prévues

- Martin-Clouaire R., Rellier J.-P., Paré N., Voltz M., Biarnès A. (Soumis). Modelling management practices in viticulture taking resource limitations into account, *Environmental Modelling & Software*.

Communications

- Gary C., Ripoche A., Celette F., Metay A., Bouisson Y., Gaudin R., 2011. Des stratégies adaptatives d'enherbement des parcelles viticoles pour des performances agronomiques et environnementales régulières. Actes 4ème journée Scientifique sur la Vigne et le Vin, Montpellier, 20 mai 2011, 21-24.
- Gary C., Gaudin R., Metay A., 2014. Gestion de l'entretien du sol et fonctionnement hydrique du vignoble. Carrefours de l'Innovation Agronomique (CIAg) : « Viticulture et stress hydrique », 17 juin 2014, Montpellier. <http://www6.inra.fr/ciag/Colloques-Agriculture/Viticulture-et-stress-hydrique>
- Gary C., 2014. Table ronde « Changer de modèle agricole ». Colloque AGDUQUE (Agriculture Durable et Qualité de l'Eau), 13 novembre 2014, Perpignan. <http://www.perpignanmediterranee.com/Preservation-des-ressources-en-eau...-Un-colloque-historique---6017.phtm>
- Guilpart N., Roux S., Metay A., Gary C., 2014. Experimental evidence of a tradeoff between powdery mildew regulation and grape yield in vineyards. 13th ESA Congress, 25-29 August 2014, Debrecen, Hongrie.
- Guilpart N., Metay A., Gary C., 2011. Indirect estimation of nitrogen reserve contribution of annual grapevine growth. In: V. Novello, M. Bovio, S. Cavaletto (eds), Proceedings of the 17th international Giesco Symposium, Asti (Italie), 171-174.
- Kazakou E., Fried G., Richarte J., Lesniak V., Guilpart N., Andrieux P. et Metay A., 2012. Réponses de la flore adventice aux différents modes d'entretien du sol et effets sur la croissance de la vigne : le cas du domaine du Chapitre (Hérault). Actes 5ème journée Scientifique sur la Vigne et le Vin, Montpellier, mai 2012, 4 pages.
- Ripoche A., Rellier J.P., Martin-Clouaire R., Gary C., 2011. The management of intercrops in vineyards should be adaptive to buffer the effects of climate variability on the grapevine performances. In: V. Novello, M. Bovio, S. Cavaletto (eds), Proceedings of the 17th international Giesco Symposium, Asti (Italie), 103-106.
- ### Mémoire de thèse
- Guilpart N. 2014. Relations entre services écosystémiques dans un agroécosystème à base de plantes pérennes: compromis entre rendement de la vigne et régulation de l'oidium. in : Thèse de doctorat. Montpellier SupAgro, 27 février 2014. Montpellier. 180pp.
- Pare N., 2011. Pollution de l'eau par les pesticides en milieu viticole languedocien. Construction d'un modèle couple pression-impact pour l'expérimentation virtuelle de pratiques culturales à l'échelle de petits bassins versants. Thèse de Doctorat, Montpellier SupAgro, UMR LISAH, Montpellier, 301 pp. et annexes. (*partiellement issu du projet SP3A*)

Rapports, Stages

- Bonnefoy A., 2013. Modélisation des pratiques agricoles en vue de l'évaluation des impacts hydrologiques de scénarios d'évolution des techniques d'entretien du sol dans un bassin versant méditerranéen, Mémoire de fin d'étude d'ingénieur, ENGEES, UMR LISAH, Montpellier, 64 pages et annexes.
- Chavassieux D., 2013. Reduction of water pollution from pesticides surface runoff in viticulture : soil maintenance practices, dialogue networks and testing of normative backcasting scenarios. Mémoire ISARA Lyon.
- Cothenet, M., Declercq, R. and Mahieu, M., 2012. Réalisation d'une base de données pour la proposition de scénarii de pratiques agricoles visant à améliorer la qualité des eaux de surface. Le bassin versant du Rieutort, Hérault. Montpellier SupAgro et UMR LISAH, 46 pages et fichiers en annexe.
- Garcia, L., 2013. Evaluation des conséquences hydriques et azotées de différents modes de gestion de parcelles viticoles sur la croissance de la vigne. Approche par l'expérimentation virtuelle. Cas de l'enherbement spontané dans le bassin versant du Rieutort. Projet SP3A – GESSOL. Mémoire d'Ingénieur Agronome, 2^o année, Montpellier SupAgro, UMR LISAH et UMR System, 70 pages et annexes.
- Lesniak, V., 2011. Etude des dynamiques des flores adventices pour différents modes d'entretien du sol en parcelles viticoles, Master 1, Biologie Environnement, Spécialité GEPV, Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand II, 61 p.
- Pare, N., 2011. Les activités non primitives dans DHIVINE. Rapport interne UMR LISAH, 82 p.
- Pare, N., 2011. Les classes d'objet dans DHIVINE. Rapport interne UMR LISAH, 56 p.
- Tindon Y., 2012. Spatialisation des risques de stress hydrique du vignoble en fonction des différents types d'entretien des sols : application au cas d'un bassin versant méditerranéen. Mémoire d'ingénieur agronome. Montpellier sup agro, IFV.