

Evaluer par modélisation des stratégies de réduction des usages d'herbicides dans les bassins versants viticoles

Biarnès A.¹, Andrieux P.^{2,3}, Barbier J.M.⁴, Bonnefoy A.², Compagnone C.⁵, Delpuech X.⁶, Gary C.⁷, Metay A.⁸, Rellier J.-P.⁹, Voltz M.²

¹IRD, UMR LISAH INRA-IRD-SupAgro, 2 place Viala, F-34060 Montpellier Cedex 1

²INRA, UMR LISAH INRA-IRD-SupAgro, 2 place Viala, F-34060 Montpellier Cedex 1

³INRA, ASTRO Agrosystèmes tropicaux, F-97170 Petit-Bourg (Guadeloupe)

⁴INRA, UMR Innovation CIRAD-INRA-SupAgro, 2 place Viala, F-34060 Montpellier Cedex 1

⁵AgroSup, UMR CEASER, AgroSup-INRA, 26, bd Docteur Petitjean, BP 87999, F-21079 Dijon Cedex

⁶Institut Français de la Vigne et du Vin (IFV), 7 avenue Yves Cazeaux, F-30230 Rodilhan

⁷INRA, UMR SYSTEM CIRAD-INRA-SupAgro, 2 place Viala, F-34060 Montpellier Cedex 1

⁸SupAgro, UMR SYSTEM CIRAD-INRA-SupAgro, 2 place Viala, F-34060 Montpellier Cedex 1

⁹INRA, Unité de Mathématiques et Informatique Appliquées, BP 52627, F-31326 Castanet-Tolosan Cedex

Correspondance : marc.voltz@inra.fr

Résumé

La réduction des risques de contamination des eaux de surface et souterraines par les herbicides est un enjeu important en région viticole méditerranéenne du fait de risques élevés liés à l'importance des écoulements de surface et aux usages d'herbicides. L'article présente une méthodologie d'évaluation par modélisation de stratégies d'entretien du sol choisies par un groupe d'experts pour réduire le ruissellement polluant par herbicides tout en préservant la production. La méthodologie est basée sur une chaîne de modèles permettant de simuler dans différents contextes climatiques, les itinéraires techniques d'entretien du sol, les dynamiques d'états de surface du sol, les flux de ruissellement polluant, les stress hydrique et azoté subis par la vigne et leurs impacts sur les rendements en raisin. Les résultats, discutés au regard des logiques d'action des viticulteurs du site étudié, le bassin du Rieurtord dans l'Hérault, montrent que la réduction d'usage d'herbicides est indispensable pour la réduction de la contamination des eaux, mais que les stratégies doivent comporter une certaine flexibilité d'application en fonction des années et des sols pour satisfaire les objectifs de production. Ils indiquent toutefois qu'à terme l'abandon total des herbicides est à rechercher pour garantir la qualité des masses d'eau issues du ruissellement.

Mots-clés: Entretien du sol, Enherbement, Etats de surface du sol, Ruissellement, Pollution de l'eau, Rendement en raisin.

Abstract: A modelling approach for evaluating strategies of reduction of chemical weeding practices in vineyard catchments

Limiting surface and groundwater contamination by herbicides is a major challenge in Mediterranean vineyards given the intense chemical weeding practices and high intensities of surface runoff flows. This

paper presents a modelling approach for estimating the impact on both water contamination and grape yields of several soil treatment strategies chosen by a group of experts so as to restrict the use of herbicides. The modelling approach consists in a chain of models simulating, for different climatic scenarios, the order of agricultural operations, the change in soil surface conditions, surface runoff flows, grape yield gaps caused by water and nitrogen stresses. The results obtained on the case study of the Rieutord Catchment in south France show that a drastic reduction of herbicide application is essential for keeping water contamination below an acceptable level, but that some flexibility in the application of the strategies following the local soils and climatic is desirable to secure the grape yields. However in any case, it is suggested that only the complete ban of chemical weeding practices may in the end guaranty the good status at surface waters.

Keywords: Soil treatment, Grass cover, Soil surface states, Surface runoff, Water pollution, Grape yield.

Introduction

La réduction des risques de ruissellement polluant est un enjeu majeur 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 de surface et souterraines, ces dernières étant alimentées dans de nombreux cas par le ruissellement de surface.

Parallèlement à une réduction de ces usages, une des voies possibles permettant la limitation de la contamination 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 de l'état de la couche de surface du sol et, qu'en zone viticole les états de la surface du sol (EdS) 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, tant au plan des contraintes organisationnelles que de la production.

Dans ce contexte, cet article rend compte d'une méthodologie d'évaluation par modélisation de l'impact de stratégies d'entretien du sol en viticulture méridionale sur la contamination des eaux de surface par les herbicides et la production viticole. La méthodologie a été utilisée dans le cadre d'une recherche de modalités d'entretien du sol et de répartitions spatiales de ces modalités permettant de réduire à l'échelle du bassin versant le ruissellement polluant par les herbicides, tout en étant économiquement, techniquement et socialement acceptables par les viticulteurs.

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 du captage d'Alimentation en Eau Potable (AEP) Limbardie. 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 (http://www.deb.developpement-durable.gouv.fr/telechargements/ouvrages_grenelles.php).

Le travail présenté est issu du projet SP3A « Spatialisation de Pratiques Agricoles Adaptées et Acceptables » (Andrieux et al., 2015), soutenu par le programme GESSOL du Ministère de l'Ecologie, de l'Environnement et de la Mer.

Nous présentons dans la suite les stratégies d'entretien du sol évaluées, puis les principes et résultats de la démarche d'évaluation par modélisation, et terminons par une discussion de l'intérêt de la démarche pour accompagner le changement de pratiques agricoles.

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 les différents partenaires de l'étude, chercheurs, animateurs de bassins, conseillers agricoles, complété à la fois par un travail d'enquêtes et entretiens individuels auprès d'agriculteurs (Sayre, 2012 ; Chavassieux, 2013) et une évaluation des contraintes liées à la modélisation, deux stratégies principales de réduction des herbicides ont été ciblées (Tableau 1). Elles proposent une réduction drastique, par rapport à la moyenne régionale de l'indice de fréquence de traitement (IFT) herbicide (valeur 0,9 selon Mezière et al. (2009)):

La première stratégie, dite stratégie 1a ou « zéro herbicide », interdit l'emploi de tout herbicide et vise donc un **IFT de 0** aux échelles de la parcelle et du bassin versant.

La deuxième, dite stratégie 2a, 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. Elle vise un **IFT de 0,3** aux échelles de la parcelle et du bassin versant.

Pour introduire de la souplesse dans les exploitations viticoles et mieux pouvoir gérer l'hétérogénéité des contraintes organisationnelles et agronomiques au sein de chaque territoire d'exploitation, **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 de l'étude, les seules parcelles concernées par cette souplesse ont été les parcelles aux inter-rangs très étroits ($\leq 1,6$ m) qui ne peuvent pas être désherbées mécaniquement et sont facilement repérables sur des images satellites. Il est escompté que les variantes favorisent l'acceptabilité de stratégies de réduction d'emploi d'herbicide par rapport à des stratégies trop rigides.

Tableau 1 : Les stratégies candidates retenues

Stratégie	Objectif IFT annuel à l'échelle du BV	Usages d'herbicides associés
1a	0	Zéro herbicide sur le rang et inter-rang
1b	$\leq 0,1$	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	$\leq 0,3$	Autorisation d'un désherbage de post-levée sur $\frac{1}{3}$ de la superficie de la parcelle (\approx sur le rang)
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)

Les stratégies étudiées correspondent à un changement net par rapport aux pratiques courantes. Elles diminuent fortement l'usage d'herbicides et cherchent à favoriser le maintien d'états de surface du sol les plus infiltrants possibles, en favorisant le travail du sol et l'enherbement des parcelles. Chaque fois que le type de sol le permet d'après un indicateur de stress hydrique potentiel, tout ou partie des inter-rangs font l'objet d'un enherbement permanent. Lorsqu'un enherbement permanent n'est pas possible, le maintien d'un enherbement naturel d'hiver (détruit par travail du sol ou désherbage chimique selon sa localisation dans la parcelle et la stratégie envisagée) est préconisé. L'indicateur de stress hydrique potentiel par type de sol choisi est le nombre moyen de jours de stress pendant la période débourrement – véraison, estimé sur un ensemble représentatif d'années climatiques (1993-2010) par des simulations de bilan hydrique à l'aide du modèle WaLIS (Celette et al., 2010).

A l'échelle du bassin versant, les stratégies d'entretien du sol sélectionnées conduisent ainsi à des répartitions contrastées des techniques d'entretien du sol au sein du vignoble (Tableau 2).

Tableau 2: Importance relative des différentes techniques d'entretien du sol au sein du vignoble du bassin versant, selon la stratégie. La superficie totale en vigne est plus importante pour les stratégies b que pour les stratégies a, car dans les stratégies a, les vignes étroites ne peuvent pas être entretenues par désherbage chimique et sont donc considérées comme étant arrachées.

Stratégie	Superficie totale en vigne (ha)	% de la superficie viticole entretenue par		
		Enherbement hivernal détruit par désherbage chimique	Enherbement hivernal suivi de travail du sol	Enherbement permanent
1a	1463	0	72	28
2a		34	38	28
1b	1511	4	70	26
2b		38	35	26

2. Une chaîne de modèles pour évaluer les impacts productifs et environnementaux des stratégies

L'évaluation de l'impact de la mise en œuvre d'une stratégie d'entretien du sol en termes de contamination des eaux et de production viticole est une opération complexe. La définition d'une stratégie générale d'entretien du sol, telle que celles définies précédemment, ne fait qu'indiquer un objectif à atteindre en matière d'IFT et des moyens autorisés. Estimer en conséquence le risque réel de contamination des eaux sur un territoire soumis à cette stratégie nécessite de connaître les caractéristiques exactes de la pression en produits phytosanitaires (dates et doses de traitements) et de la vulnérabilité du milieu (e.g. régime climatique, potentiel de ruissellement des sols). Ces caractéristiques sont certes sous l'influence de la stratégie d'entretien adoptée mais elles dépendent également des conditions climatiques, de la variabilité des sols, des contraintes parcellaires, et des contraintes d'organisation du travail dans les exploitations du bassin versant étudié. La chaîne de modélisation a donc pour objectif de simuler l'interaction entre ces facteurs et la stratégie d'entretien et d'estimer de manière complémentaire son impact productif. Elle comprend dans le cadre de la démarche rapportée ici :

- **Un modèle de décision** (Dhivine) 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 de l'état 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 (WaLIS)** pour une association herbe-vigne et un bilan azoté couplé permettant de simuler les niveaux de stress hydrique et azoté et de calculer des indicateurs de réduction du rendement potentiel ;
- **Un modèle hydrologique (MHYDAS) 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 de vigne.

La chaîne de modélisation a été implémentée selon le schéma général en Figure 1 pour neuf scénarios climatiques annuels représentant la variabilité climatique du bassin versant du Rieutord.

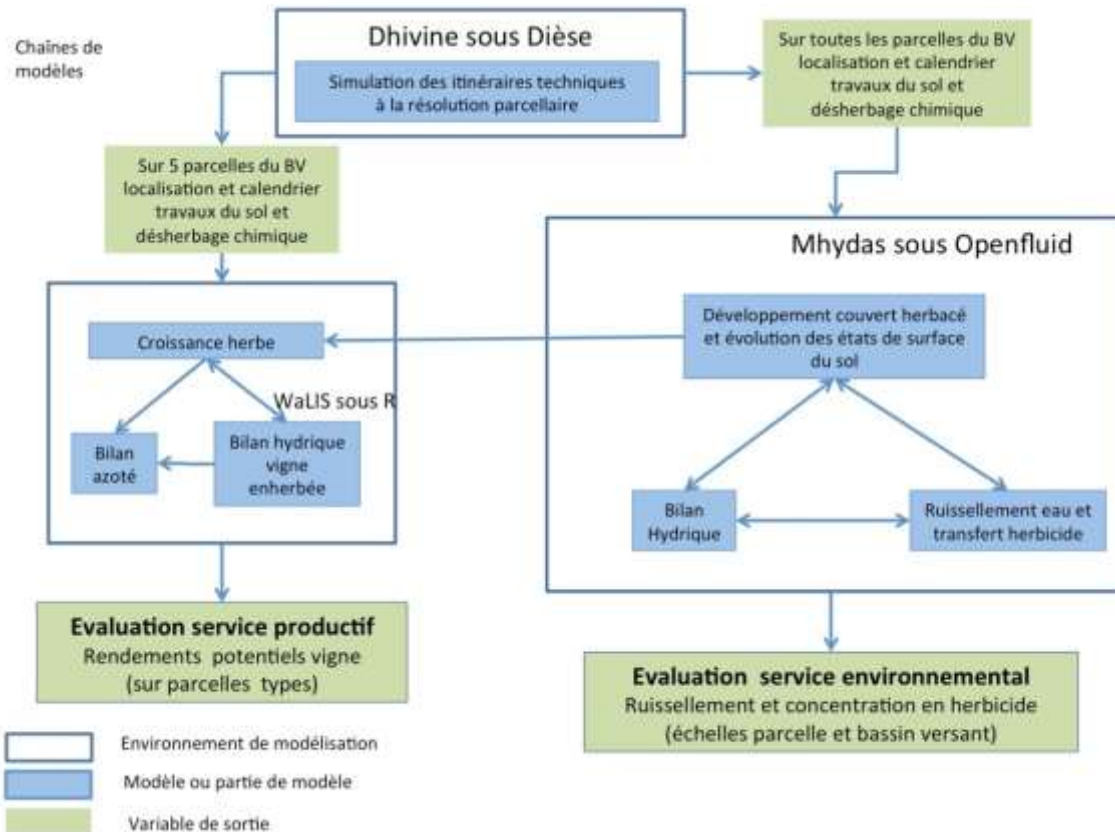


Figure 1 : Schéma général décrivant les chaînes de modèles utilisés pour l'évaluation des stratégies candidates

2.1 Un modèle pour simuler les itinéraires techniques 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 (Martin-Clouaire et al., 2016). Ce modèle a été construit à partir d'une connaissance sur la conduite du vignoble dans la plaine viticole héraultaise, issue d'enquêtes auprès de 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 culturales 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 (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. 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'une liste de chantiers d'opérations

culturelles à réaliser sous la dépendance, notamment, du matériel et de la main d'œuvre mobilisables, des conditions de déclenchement et d'arrêt des chantiers (par exemple, un stade phénologique de vigne, la fin d'un autre chantier), des parcelles concernées, des degrés de priorités entre chantiers concurrents.

2.2 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 est basée sur la modélisation de deux processus combinés : i) le processus de développement d'une croûte structurale à la surface du sol après travail du sol en fonction de l'énergie cinétique de la pluie, ii) le processus de développement d'un enherbement naturel spontané en considérant deux phases: l'émergence et la croissance. Une typologie des états de surface fondée sur l'état de développement des croûtes structurales et du pourcentage de couverture du sol par les adventices permet ensuite d'estimer l'évolution de l'infiltrabilité du sol, variable déterminant le potentiel de ruissellement du sol dans la modélisation hydrologique.

2.3 Des modèles de simulation des stress hydrique et azoté pour estimer le rendement

Le stress hydrique à la floraison et le stress azoté sont de bons indicateurs des risques de baisse de rendement l'année suivante (Guilpart et al., 2014) dans une parcelle donnée. Ces indicateurs sont utilisés dans cette étude pour évaluer le pourcentage de réduction du rendement potentiel de la parcelle déclaré par le viticulteur. Pour une année climatique donnée, le niveau de stress hydrique à la floraison est simulé par le modèle de bilan hydrique WaLIS (Celette et al., 2010). Celui de stress azoté est calculé par la méthode du bilan azoté, compte tenu des apports d'azote déclarés par le viticulteur. L'approche, mise en œuvre dans des parcelles représentatives de la diversité des types de sol du bassin et pour les différents scénarios climatiques représentatifs de la variabilité climatique de la région, permet d'identifier les modalités d'enherbement naturel 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 inacceptables pour les producteurs.

2.4 Un modèle hydrologique distribué pour simuler le ruissellement polluant

Pour 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 sur la plateforme de modélisation OpenFLUID (Fabre et al., 2010). Elle considère en entrée i) les calendriers culturels, simulés avec le modèle Dhivine, relatifs aux opérations d'entretien du sol, ii) les caractéristiques des scénarios climatiques testés, 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 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.

3. Les résultats de l'évaluation par modèle

3.1 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. 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, puisque la pousse de l'herbe en dépend. La conséquence est 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 évènements 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.

3.2 L'évaluation des impacts de l'enherbement sur le rendement

Les simulations de bilan hydrique et azoté, réalisées sur cinq parcelles types correspondant aux cinq principaux sols du bassin versant, ont permis d'évaluer les risques de baisse de rendement lié à la présence d'un enherbement hivernal ou permanent dans les parcelles de vigne selon le climat de l'année.

Les résultats des simulations (Tableau 3) montrent que les risques de baisse de la production de raisin varient selon la pratique d'enherbement mise en œuvre, le type de sol, et le climat de l'année. L'enherbement permanent de tous les inter-rangs est possible quel que soit le climat de l'année sur les sols alluviaux profonds à forte réserve hydrique. A l'inverse l'enherbement, même limité à la période hivernale, n'est jamais possible sur les sols pierreux peu profonds car le risque de stress hydrique et donc de stress azoté est trop important, et ce d'autant plus que la fréquence d'années sèches est relativement élevée dans la région. Pour les autres types de sols, l'enherbement est possible, mais son impact varie selon son étendue spatiale au sein de la parcelle (nombre d'inter-rangs concernés) et sa durée (permanent ou hivernal) et les conditions climatiques de l'année. Cela suggère que dans ces sols, les pratiques d'enherbement doivent pouvoir être ajustées chaque année pour cadrer avec la réalité climatique et les contraintes subies par la vigne.

Tableau 3 : Acceptabilité des pratiques d'enherbement naturel selon le type de sol, à l'échelle de la parcelle. Une pratique est considérée comme acceptable si la réduction de rendement simulée est inférieure à 15%. ++ : acceptable tous les ans ; + : acceptable au moins un an sur deux ; - : toujours inacceptable.

Pratique d'enherbement naturel dans les inter-rangs	Type de sol				
	Alluvial	Fersial-litique	Molasse	Argileux	Pierreux peu profond
Enherbement permanent de tous les inter-rangs	++	+	+	-	-
Enherbement permanent un inter-rang sur deux et enherbement hivernal un inter-rang sur deux	++	++	++	+	-
Enherbement hivernal de tous les inter-rangs	++	++	++	++	-

Les impacts du mode de destruction de l'enherbement hivernal naturel (par désherbage chimique ou par travail du sol) n'apparaissent pas dans le tableau car ils ne se différencient pas en terme de stress hydrique et azoté simulés pour la vigne, principalement parce que les différences d'états de surface induits par les modes de destruction ne perdurent que de manière transitoire sur l'ensemble de la période de culture.

Des résultats plus détaillés sur quelques pratiques d'enherbement (Tableau 4) 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 évité par une fertilisation adaptée, en dose et en forme d'apport.

Tableau 4 : Risques de stress hydrique et azotés et pertes de rendement selon le type de sol, la pratique d'enherbement et le type d'année. IR : Inter-rang, Rdt : Rendement * : si complément de fertilisation.

Type de sol	Enherbement testé	Rdt objectif (Qx/ha)	Risque de stress		Perte de rendement estimé (en % Rdt objectif)		
			Hydrique	Azoté	Année sèche	Année moyenne	Année humide
Sol alluvial	Permanent dans tous les IR	80	Pas de stress	Fort	0% *	0% *	0% *
Sol sur Molasse	Permanent dans tous les IR	45	Fort en année sèche	Pas de stress	-66%	-31%	-22%
Sol fersiallitique	Permanent dans tous les IR	45	Modéré	Pas de stress	-31%	-5%	0%
Sol argileux	Permanent 1 IR sur 2 - Hivernal 1 IR sur 2	80	Modéré	Risque de stress	-66%	-14%	- 5% *
Sol pierreux, peu profond	Hivernal tous les IR	20	Fort et permanent	Pas de stress	-100%	-83%	- 66%

3.3 L'évaluation des impacts environnementaux

Les impacts environnementaux des quatre stratégies normatives sur le bassin versant du Rieutort ont été simulés avec le modèle MHYDAS. Le Tableau 5 présente une synthèse des résultats.

Les résultats obtenus confirment l'effet majeur 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 (4% sur la superficie viticole), 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 préservatrices des ressources en eau.

Tableau 5: Valeurs simulées des pertes cumulées et des concentrations maximales annuelles en pesticides dans les eaux de ruissellement à l'exutoire du bassin du Rieutort selon les quatre stratégies normatives.

Stratégie	Pression (% de la surface viticole désherbée chimiquement)	Pertes en pesticides (kg)			Taux de pesticides sortant relativement à une application de 2 kg/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 maximales (µg/l)			Ruissellement (mm)		
		moyenne	minimum	maximum	moyenne	minimum	maximum
2b	38	2,1	0,0001	3,5	181,8	50,0	288,3
2a	34	2,0	<0,0001	3,4	181,7	50,0	288,1
1b	4	0,2	<0,0001	0,3	181,1	49,9	286,3
1a	0	0	0	0	180,9	49,9	286,2

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. On notera également qu'il suffit de pertes extrêmement faibles en pourcentage de pesticides épandus sur les parcelles pour contaminer l'eau à des niveaux significatifs. Cela indique la difficulté majeure d'éviter une contamination observable dès lors qu'il y a eu épandage.

4. Bilan et discussion de l'évaluation par modélisation

4.1 La chaîne de modélisation

Une telle évaluation des performances productive et environnementale de stratégies de réduction des herbicides n'aurait pas été possible sans la chaîne de modélisation qui a été développée au cours du projet. Celle-ci est à présent 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 plusieurs limites actuelles des modèles et de leur chaînage sont à mentionner (Voir Andrieux et al. (2015) pour plus de détails). Les limites majeures sont liées aux simplifications des processus décisionnels et biophysiques mais aussi aux difficultés de paramétrage des modèles du fait de l'insuffisance de données disponibles, notamment sur les sols et les exploitations. Des améliorations devront donc être apportées à la chaîne de modélisation tout en essayant de garder un caractère opérationnel à celle-ci. Et par ailleurs se pose la question générale de l'élaboration de bases de données environnementales détaillées (sols, eaux, occupation du sol) aux échelles régionales qui sont indispensables pour raisonner et évaluer de nouvelles stratégies en matière de systèmes de culture durables aux plans productifs et environnementaux.

4.2 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. Par ailleurs, ils montrent que les éventuelles pertes de rendement sont essentiellement liées à un problème de stress hydrique. Finalement, le résultat le plus marquant est que, **telles quelles, les stratégies proposées 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**.

4.3 Analyse des stratégies par dires d'acteurs

A côté de l'approche d'évaluation des stratégies par modélisation, des entretiens auprès d'un échantillon de viticulteurs du bassin ont également été réalisés. 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 et de confronter ces logiques aux stratégies soumises à l'évaluation par modélisation.

Dans le bassin versant étudié, pour les viticulteurs « professionnels », les marges de manœuvre pour réduire l'usage des herbicides concernent uniquement la gestion du rang de vignes. Dans l'inter-rang les pratiques ont déjà très majoritairement exclu le recours aux herbicides et ce depuis plusieurs années. Ce point dénote une dynamique forte de changement chez les agriculteurs, qui remonte au début des années 2000, et s'est déjà traduite par une forte réduction de l'IFT herbicide. Le saut supplémentaire à réaliser est, chez certains viticulteurs, la réduction du nombre de désherbages sous le rang et/ou l'abandon des herbicides de pré-levée, voire l'abandon total des désherbages chimiques. Cet abandon apparaît toutefois plus difficile à concevoir et à réaliser pour un certain nombre de viticulteurs même s'il existe une tendance à un usage en développement des outils inter-ceps et donc à une réduction d'usage de produits chimiques, pouvant aller jusqu'à un état proche du 0 herbicide, au moins certaines années.

Les entretiens ont également montré que la souscription aux mesures d'aide, telles que les Mesures agro-environnementales et climatiques (MAEC), est fortement remise en cause par certains agriculteurs, la raison principale étant le manque de souplesse que cela occasionne. Ces agriculteurs recherchent des combinaisons de pratiques que le contrat ne permet pas : ainsi pouvoir associer un travail du sol avec inter-ceps à l'application d'herbicide de post-levée (selon les parcelles et les années) constitue une sécurité fortement appréciée.

Les stratégies conçues par les experts se sont donc focalisées à juste titre 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, comme objectivée par la modélisation, 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 nécessaire). Ainsi, lorsqu'elles traitent de dérogations spatiales, les stratégies conçues par les experts s'avèrent insuffisamment contrastées pour satisfaire les agriculteurs. Cela plaide pour que, dans **la construction et l'évaluation de stratégies de réduction des usages d'herbicides, 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.

Conclusion

L'approche de modélisation menée dans ce travail a permis de procéder à une évaluation quantitative de quatre stratégies de réduction des herbicides à l'échelle d'un bassin versant viticole. Elle permet d'objectiver, dans la limite de ses capacités prédictives, les impacts potentiels agronomiques et environnementaux de stratégies prospectives. Elle fournit ainsi une base de discussion quantifiée pour concevoir le changement de pratiques. Dans l'exemple spécifique traité, l'évaluation par modèle a convergé avec l'analyse à dire de viticulteurs sur la nécessité d'introduire de la flexibilité dans la définition des stratégies de réduction des usages d'herbicide et des modalités d'entretien du sol associées. En effet, elle montre qu'une certaine souplesse est i) nécessaire pour satisfaire les objectifs de production et ii) possible sans élever de manière forte le niveau de contamination des eaux de ruissellement. Elle indique toutefois aussi qu'à terme l'abandon total des herbicides est à rechercher pour garantir la qualité des masses d'eau issues du ruissellement.

L'approche de modélisation n'est bien sûr pas suffisante à elle seule pour déterminer des stratégies répondant aux objectifs productifs et environnementaux et adaptées aux conditions locales d'un territoire. Mais elle peut utilement s'inscrire dans une démarche de co-construction entre les acteurs. Celle-ci n'a pu être expérimentée dans cette étude. On anticipe toutefois le problème de la mise en discussion de résultats issus d'une chaîne de modélisation complexe, dont les principes ne sont pas aisément appropriables.

Remerciements

Le projet SP3A a été financé par le Ministère français de l'Ecologie et du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE) dans le cadre du programme GESSOL (MEDDE – Ademe).

Références bibliographiques

Andrieux P., Biarnès A., Barbier J.M., Bonnefoy A., Compagnone C., Delpuech X., Gary C., Metay A., Rellier J.P., Voltz M., 2015. SP3A, Spatialisation de pratiques agricoles adaptées et acceptables. Préservation des sols viticoles méditerranéens et amélioration de leurs fonctions de régulation des flux d'eau et de matières associées. Andrieux P. et Biarnès A. (Coord.). Rapport final GESSOL (MEDDE – ADEME). 166 p.

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>.

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.

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.

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.

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.

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., Paré N., Voltz M., Biarnès A., 2016. Modelling management practices in viticulture taking resource limitations into account. *Plos One*, 11(3): e0151952. doi:10.1371/journal.pone.0151952

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., 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*

Moussa R., Voltz M., 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.

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.

Sayre L., 2012. Pratiques d'entretien du sol et relations socio-techniques des viticulteurs sur le bassin versant du Rieutort, Rapport du terrain, Projet SP3A, UMR CESEAR, AgroSup-INRA, Dijon, 40 pages.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « *Innovations Agronomiques* », la date de sa publication, et son URL)