

Chapitre 1

Cas d'application et démarche

Sommaire

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

Chapitre 1

Cas d'application et démarche

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

1.1 Cas d'application : la plaine viticole languedocienne

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

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

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

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

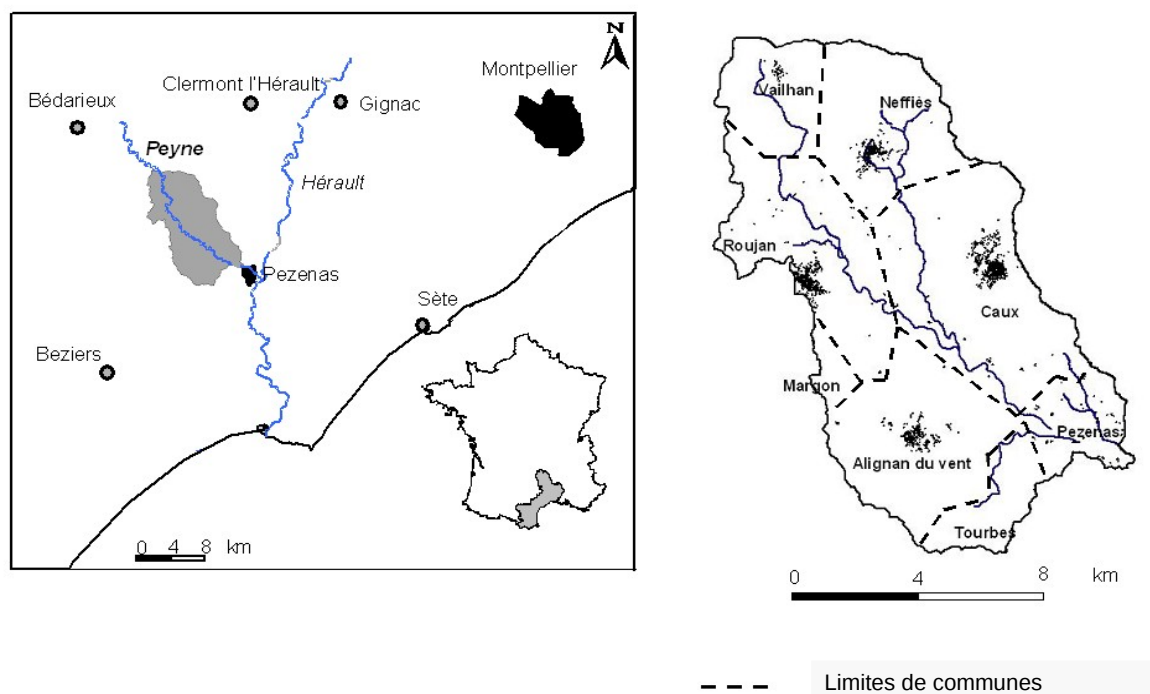


FIGURE 1.1 – Localisation géographique de la zone d'étude

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

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

1.1.2 Les systèmes de culture viticoles

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

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

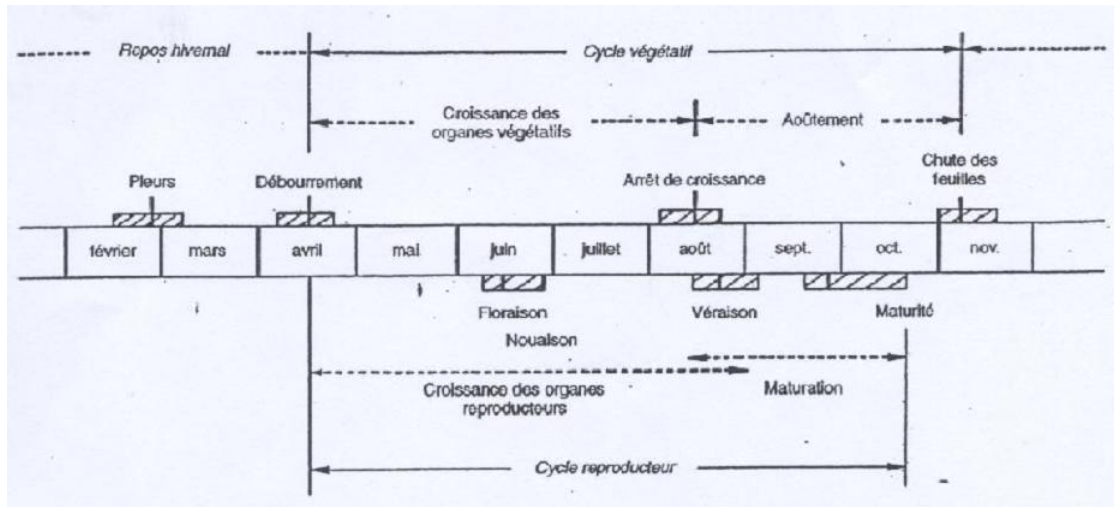


FIGURE 1.2 – Cycle végétatif et reproducteur de la vigne

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



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

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

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

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

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

1.1.3 Le contexte paysager

1.1.3.1 Caractéristiques physiques



Photographe : Y. Blanca

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

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



Photographe : Y. Blanca

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

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

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

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

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

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

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



Photographe : N. Paré

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

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

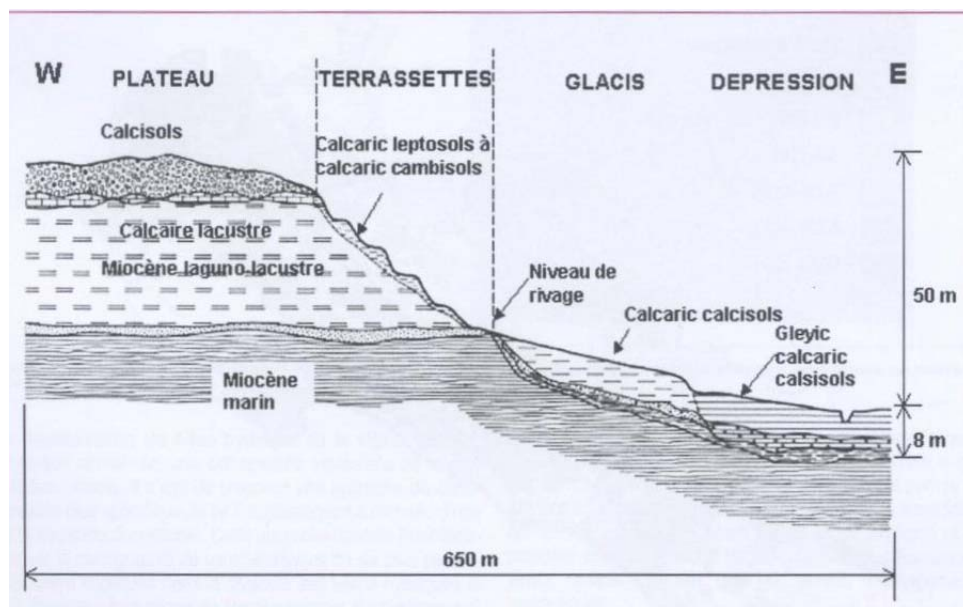


FIGURE 1.7 – Coupe géo-pédologique des sols de la Peyne

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

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



Photographe : Y. Blanca

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

En position intermédiaire, on trouve :

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

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

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

1.1.3.2 Caractéristiques du climat méditerranéen

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

1.2 Modélisation couplée pression-impact

1.2.1 Principe général de la démarche

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

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

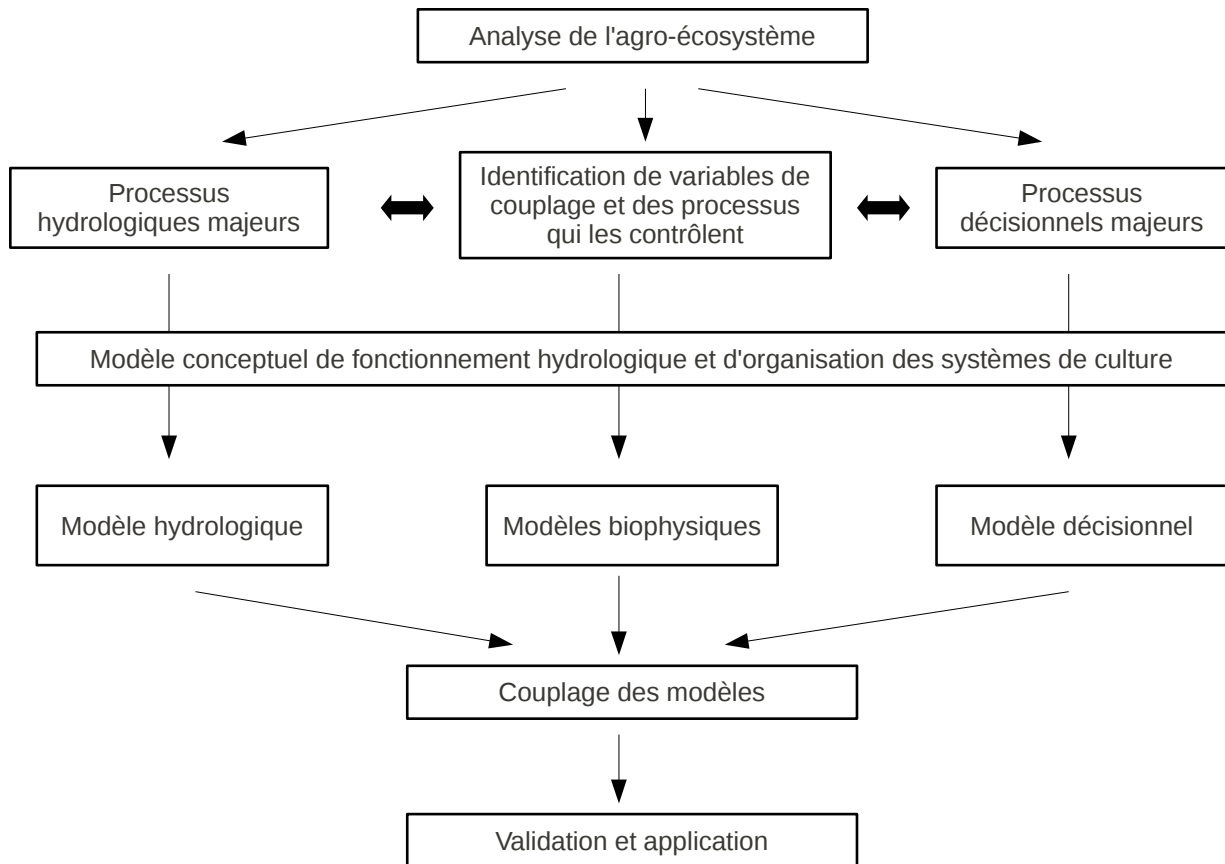


FIGURE 1.9 – Diagramme de la démarche de modélisation couplée pression-impact

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

1.2.2 De l'analyse des processus au modèle conceptuel

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

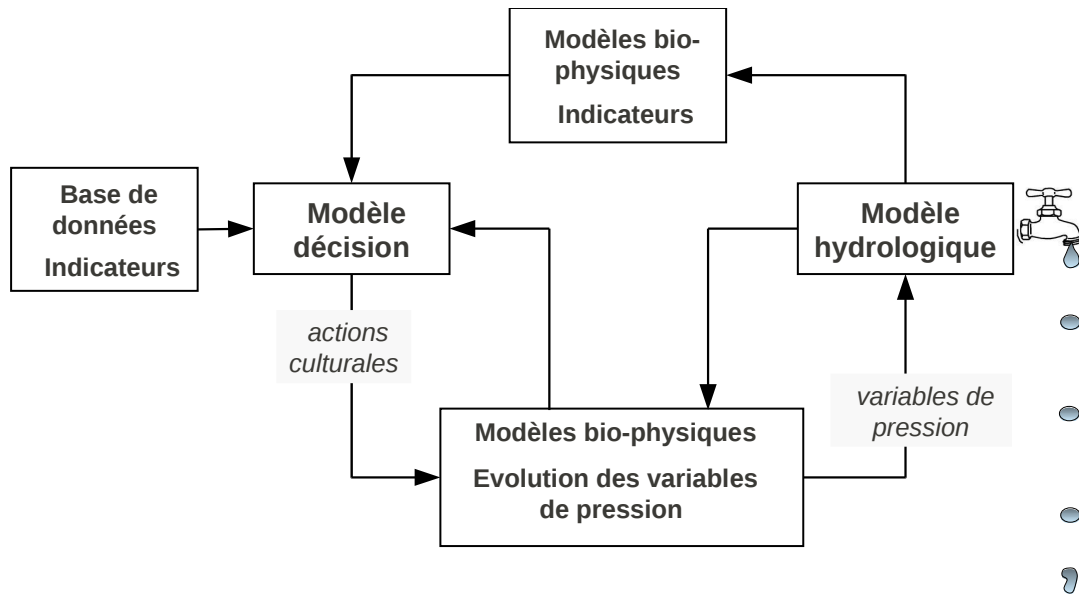


FIGURE 1.10 – Schéma du modèle conceptuel

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

1.2.2.1 Les processus décisionnels

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



FIGURE 1.12 – Photo de traitement phytosanitaire dans les vignes

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

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

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

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

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

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

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

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

1.2.2.2 Les processus biophysiques

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

1.2.2.3 Synthèse

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

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

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

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

1.2.3 Du modèle conceptuel au modèle informatique

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

1.2.3.1 Le modèle hydrologique

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

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

1.2.3.2 Le modèle décisionnel

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

1.2.3.3 Les modèles biophysiques

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

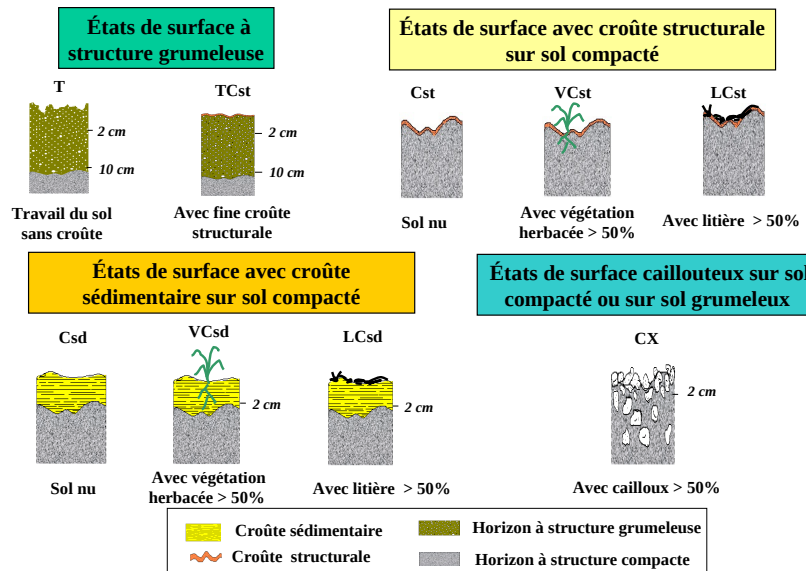


FIGURE 1.13 – Typologie des états de surface réalisée par Andrieux et al. (2001) en zone viticole méditerranéenne

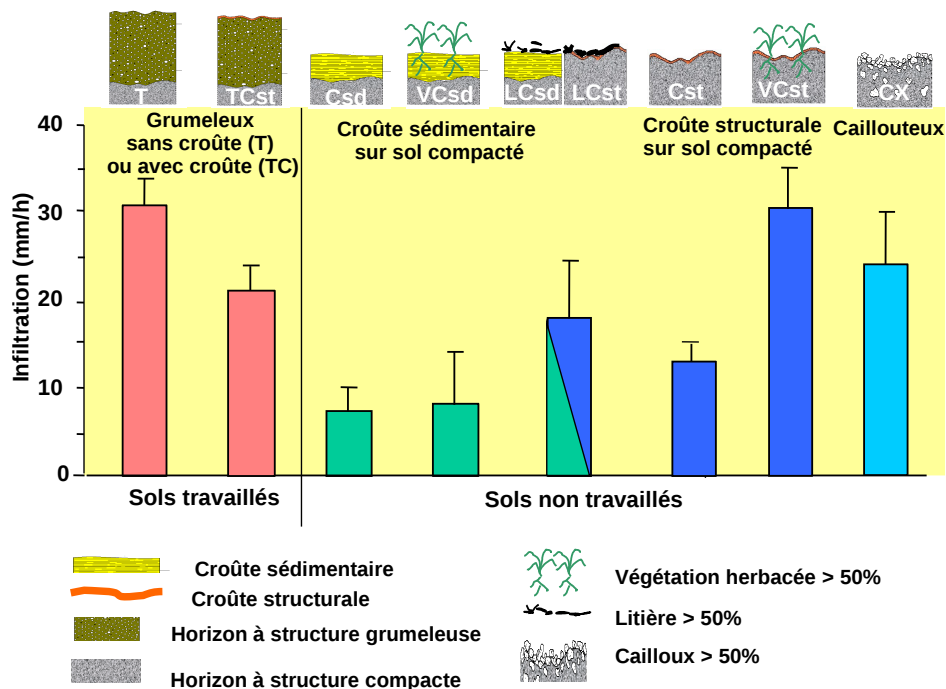


FIGURE 1.14 – Infiltrabilité de différents types d'états de surface

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

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

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

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

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

1.2.3.4 Le couplage des modèles

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Bibliographie

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

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

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

- Louchart, X. and Voltz, M. (2007). Aging effects on the availability of herbicides to runoff transfer. *Environmental Science & Technology*, 41(4) :1137–1144.
- Ludwig, B. (1992). *L'érosion par ruissellement concentré des terres sultivées du nord du Bassin Parisien : analyse de la variabilité des symptômes d'érosion à l'échelle du bassin versant élémentaire*. PhD thesis, Université Louis Pasteur Strasbourg I.
- Martin, P. (1997). *Pratiques culturales, ruissellement et érosion diffuse sur les plateaux limoneux du Nord-Ouest de l'Europe. Application aux intercultures du Pays de Caux*. PhD thesis, INA P-G.
- Martin, P. (1999). Reducing flood risk from sediment-laden agricultural runoff using intercrop management techniques in northern france. *Soil & Tillage Research*, 52(3-4) :233–245.
- Martin-Clouaire, R. and Rellier, J. (2009). Modelling and simulating work practices in agriculture. *International Journal of Metadata, Semantics and Ontologies*, 4(1/2) :42–53.
- Monnier, G. (1965). Relation of compaction and other soil properties to erosion resistance of soils. *Transactions ASAE*, 8 :419–422.
- Morel-Seytoux, H. and Alhassoun, S. (1987). SWATC.H. swiss watershed model for simulation of surface and subsurface flows in stream-aquifer system. Technical report, Department of Civil Engineering, Colorado State University.
- Moussa, R., Voltz, M., and Andrieux, P. (2002). Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood events. *Hydrological Processes*, 16(2).
- Mwendera, E. and Feyen, J. (1994). Effects of tillage and rainfall on soil surface-roughness and properties. *Soil Technology*, 7(1) :93–103.
- Ng, H., Gaynor, J., Tan, C., and Drury, C. (1995). Dissipation and loss of atrazine and metolachlor in surface and subsurface drain water - a case-study. *Water Research*, 29(10) :2309–2317.
- Nguyen, T. (2005). *A methodology for validation of integrated systems models with an application to coastal-zone management in south-west sulawesi*. PhD thesis, Engineering Technology (CTW).
- Nguyen, T. and de Kok, J. (2007). Systematic testing of an integrated systems model for coastal zone management using sensitivity and uncertainty analyses. *Environmental Modelling & Software*, 22(11) :1572–1587.
- Nguyen, T., de Kok, J., and Titus, M. (2007). A new approach to testing an integrated water systems model using qualitative scenarios. *Environmental Modelling & Software*, 22(11) :1557–1571.
- Ouvry, J. (1987). Bilan des travaux. campagne 1986-1987. rapport AREAS. Technical report.
- Papy, F. (1994). Working knowledge concerning technical systems and decision support. In *Rural and farming systems Analysis. European perspectives*, pages 222–235. Dent, J.B., Mc Gregor, M.J.(eds), CAB international edition.

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

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

