

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

6.1 Introduction

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

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

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

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

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

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

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

6.2 Matériel et méthodes

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

6.2.1 Modélisation de l'émergence

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

6.2.1.1 Les trois processus de l'émergence

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

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

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

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

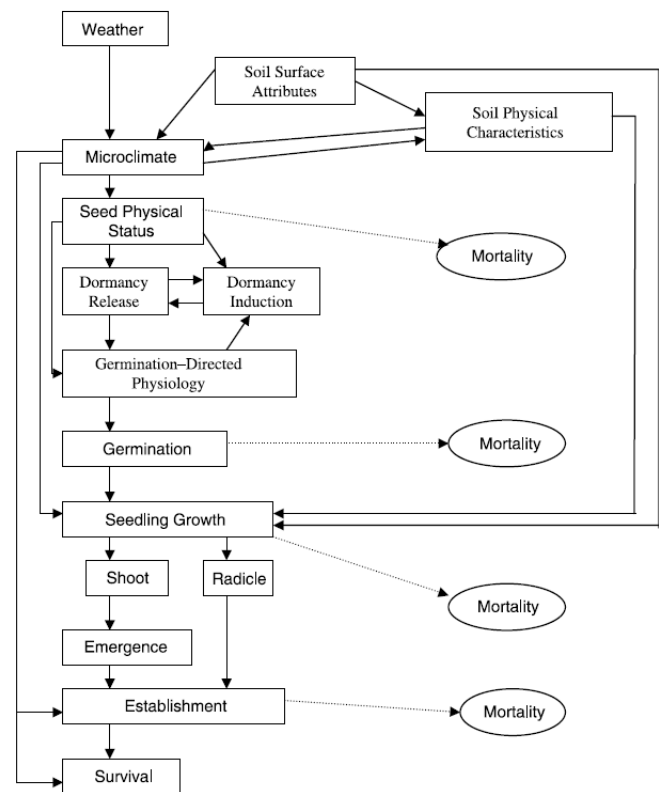


FIGURE 6.1 – Processus d'émergence d'une graine

6.2.1.2 Le choix de modéliser la germination

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

6.2.1.3 Le modèle de temps hydrothermal pour la germination

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

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

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

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

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

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

6.2.1.4 Une approche simplifiée de paramétrisation du modèle

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

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

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

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

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

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

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

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

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

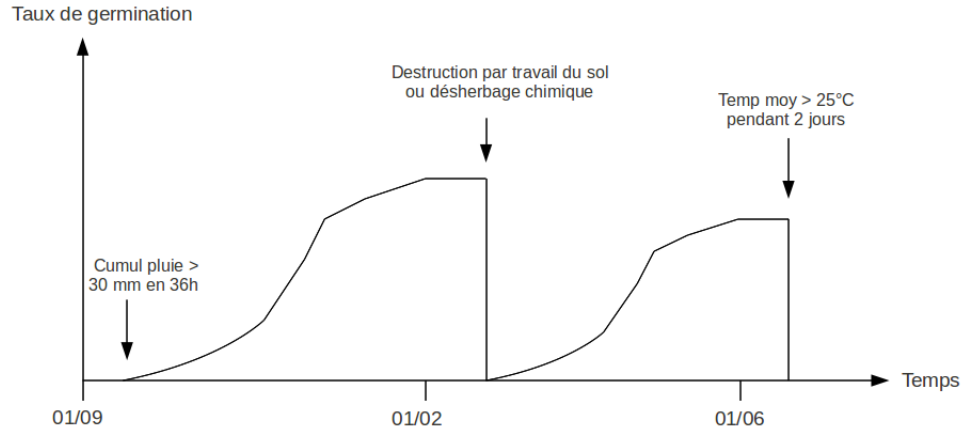


FIGURE 6.2 – Représentation de l’effet de la dormance sur la germination des adventices

6.2.2 Modélisation de la croissance

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

6.2.2.1 Le modèle de conductance pour la croissance

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

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

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

La croissance est une fonction exponentielle :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

avec k , le coefficient d'extinction

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

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

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

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

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

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

6.2.2.2 De la plante au couvert herbacé de la rangée

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

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

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

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

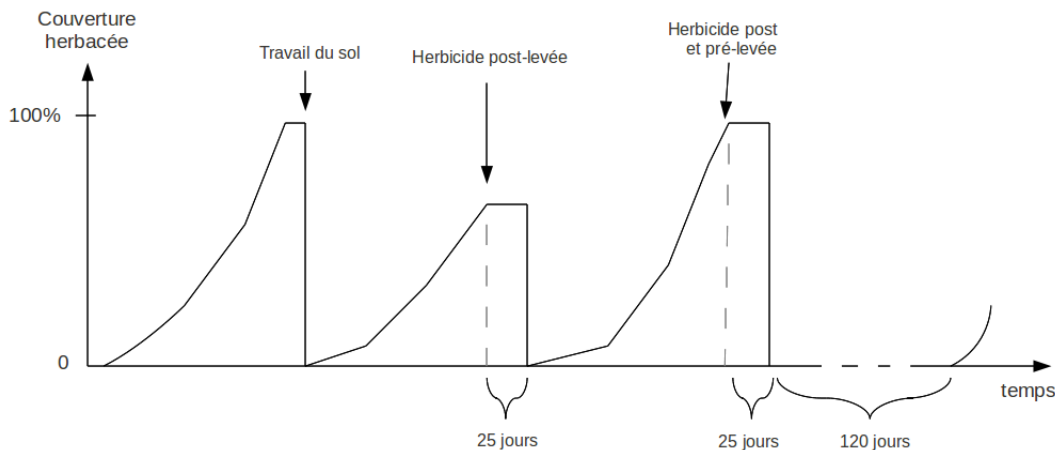


FIGURE 6.3 – Effets modélisés des actions d'entretien du sol sur le couvert herbacé

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

6.3 Résultats

6.3.1 Paramétrisation des modèles de germination et de croissance

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

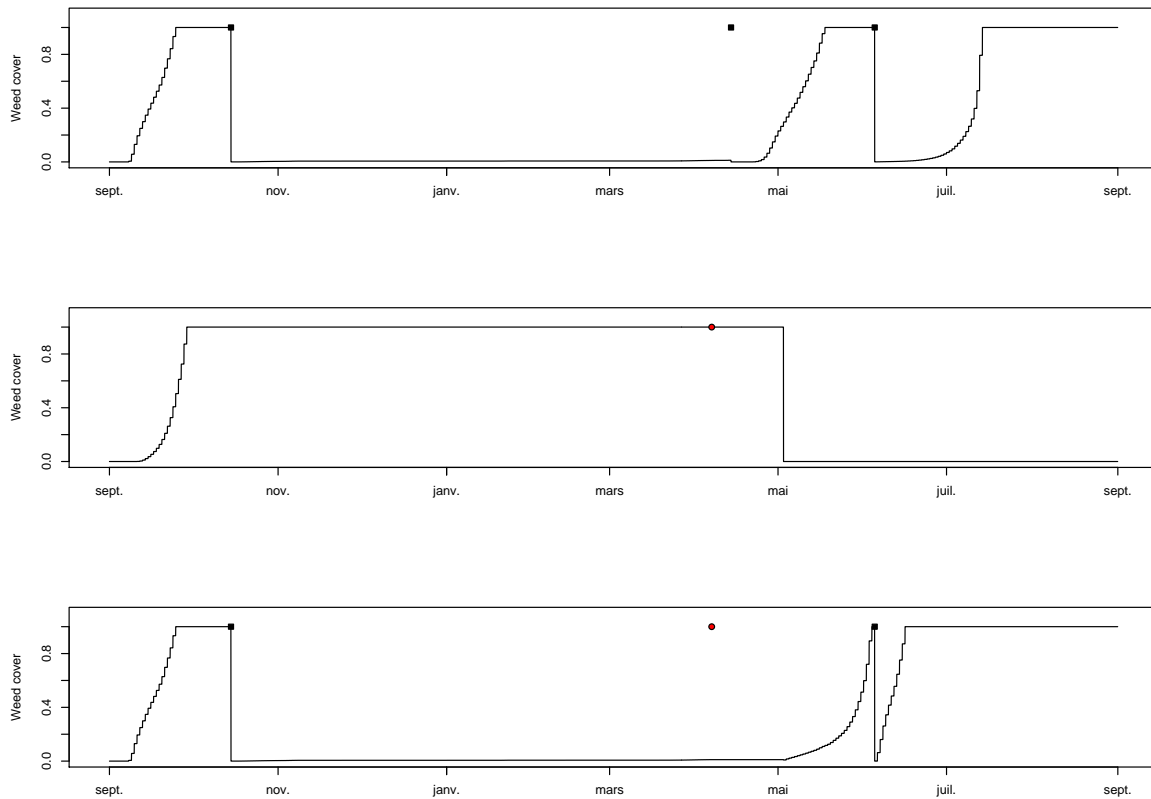


FIGURE 6.4 – Evolution de la couverture herbacée du sol pour trois itinéraires techniques : travail du sol ; désherbage chimique et combinaison désherbage chimique et travail du sol avec un potentiel hydrique fixe de -0.088 MPa.

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

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

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

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

Compte tenu de l'absence de couverture dans le cas du sol entretenu par combinaison des modalités (figure 6.4, graphe du bas), l'effet du désherbage chimique n'est pas apparent. Cela confirme l'incohérence de l'absence simulée de couverture hivernale pour cet itinéraire technique car le désherbage chimique, d'autant plus s'il emploie uniquement un herbicide de post-levée, est forcément réalisé sur une couverture herbacée présente. Cependant l'effet du désherbage chimique est visible pour l'itinéraire technique en désherbage chimique seul (figure 6.4, graphe du centre). On voit que pendant la durée d'incubation de 25 jours, la couverture reste stable puis est mise à zéro. Dans le cas de l'application d'herbicide de pré-levée en plus de l'herbicide de post-levée (figure 6.4, graphe du centre), on peut constater que la rémanence du produit empêche un nouveau développement herbacé. A l'inverse dans le cas d'application d'un herbicide de post-levée seul (figure 6.4, graphe du bas), on constate que le développement herbacé recommence après 25 jours suivant le désherbage. Pour ces sols, la composition floristique comprend *Diploaxis erucoides* mais également *Conyza canadensis*. On peut voir que l'association des espèces provoque un développement plus rapide de la couverture herbacée après un travail du sol. Cela est dû au fait que l'on réalise une somme de la couverture de chaque espèce et qu'en simulant deux espèces, on double ainsi la densité de graines au m². Plutôt que de paramétrer une densité par espèce, un paramétrage d'une densité par espèce et par type de modalité d'entretien du sol est souhaitable pour pouvoir prendre en compte les différences de nombre d'espèces modélisées.

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

6.4 Discussion et conclusion

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

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

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

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

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

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

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

Remerciements

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

Bibliographie

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

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

Chapitre 7

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

Sommaire

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

Chapitre 7

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

7.1 Introduction

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

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

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

7.2 Matériel et méthodes

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

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

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

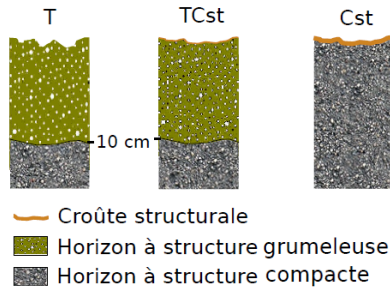


FIGURE 7.1 – Les trois types d'états de surface modélisés sur sols nus après travail du sol

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

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

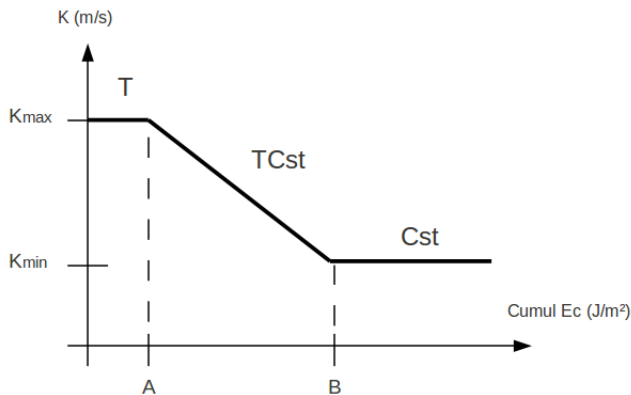


FIGURE 7.2 – Représentation de l'évolution de l'infiltrabilité sur sol nu après un travail du sol

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

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

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

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

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

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

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

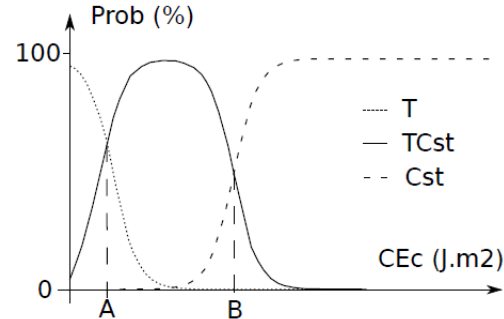


FIGURE 7.3 – Forme des courbes de probabilités des trois différents types d'état de surface selon le cumul d'énergie cinétique

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

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

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

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

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

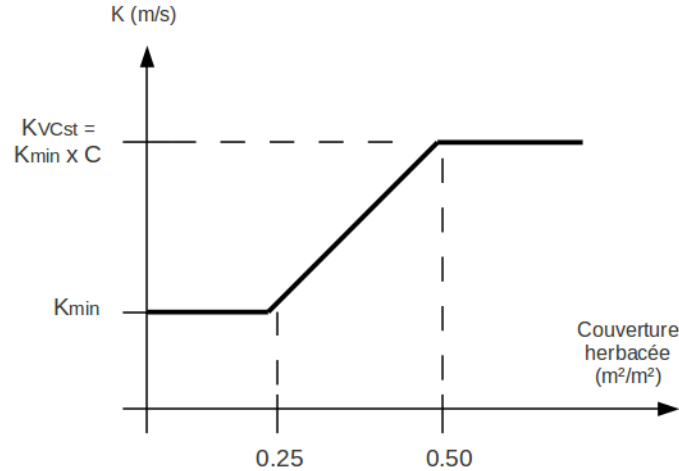


FIGURE 7.4 – Représentation de l'évolution de l'infiltrabilité sous l'effet de la croissance d'un couvert herbacé sur un sol compacté présentant une croûte structurale continue (Cst)

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

soit Tc le taux de couverture herbacée du sol,

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

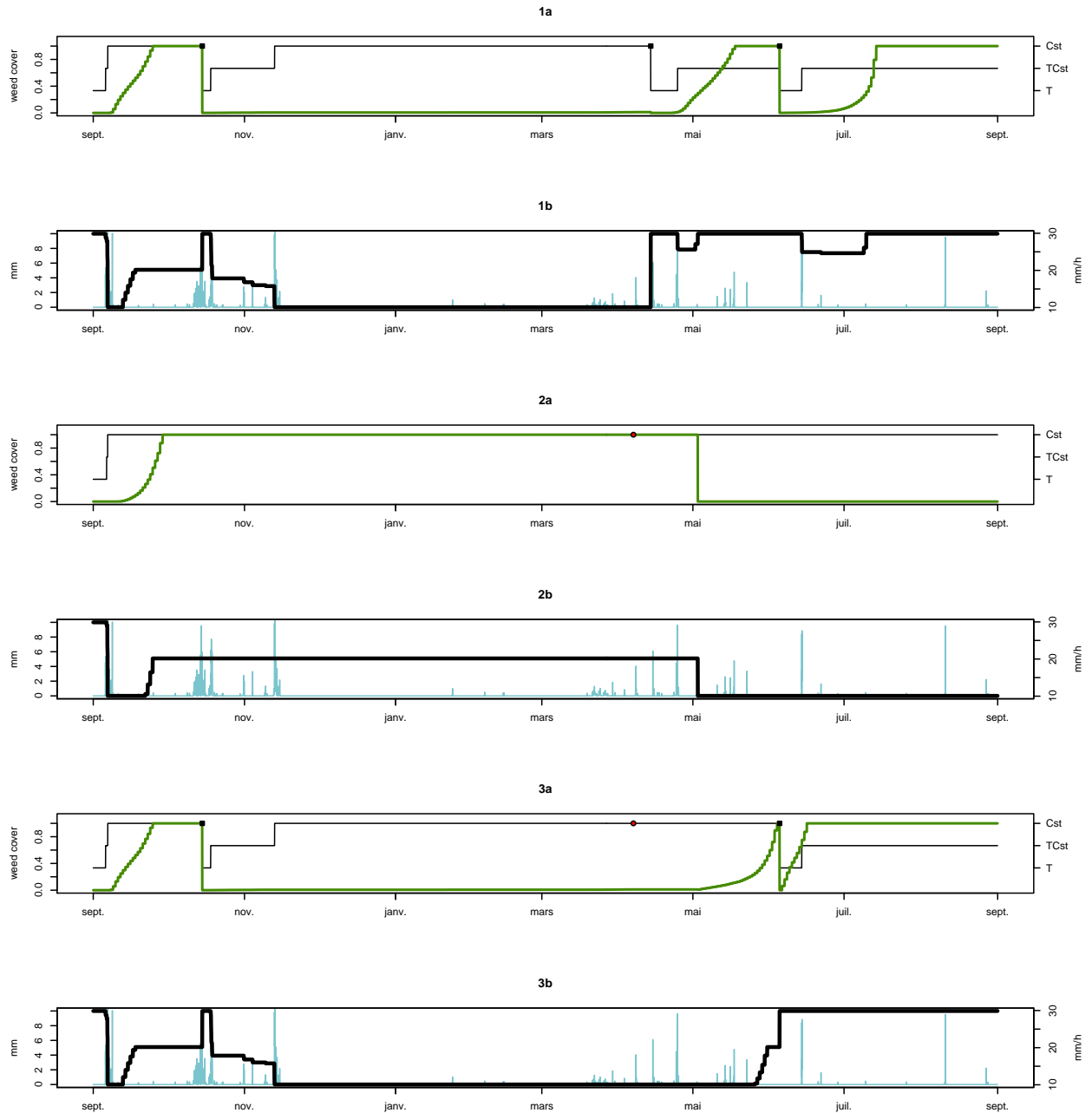


FIGURE 7.5 – Evolution de la couverture herbacée (courbe verte), des états de surface sur sols nus (courbe noire) et de l'infiltrabilité (courbe noire grasse) modélisée pour trois itinéraires techniques (de haut en bas) : travail du sol (1a;1b) ; désherbage chimique (2a;2b) ; combinaison désherbage chimique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

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

7.3 Résultats et discussion

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

7.3.4 Analyse de l'influence de la charge caillouteuse

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

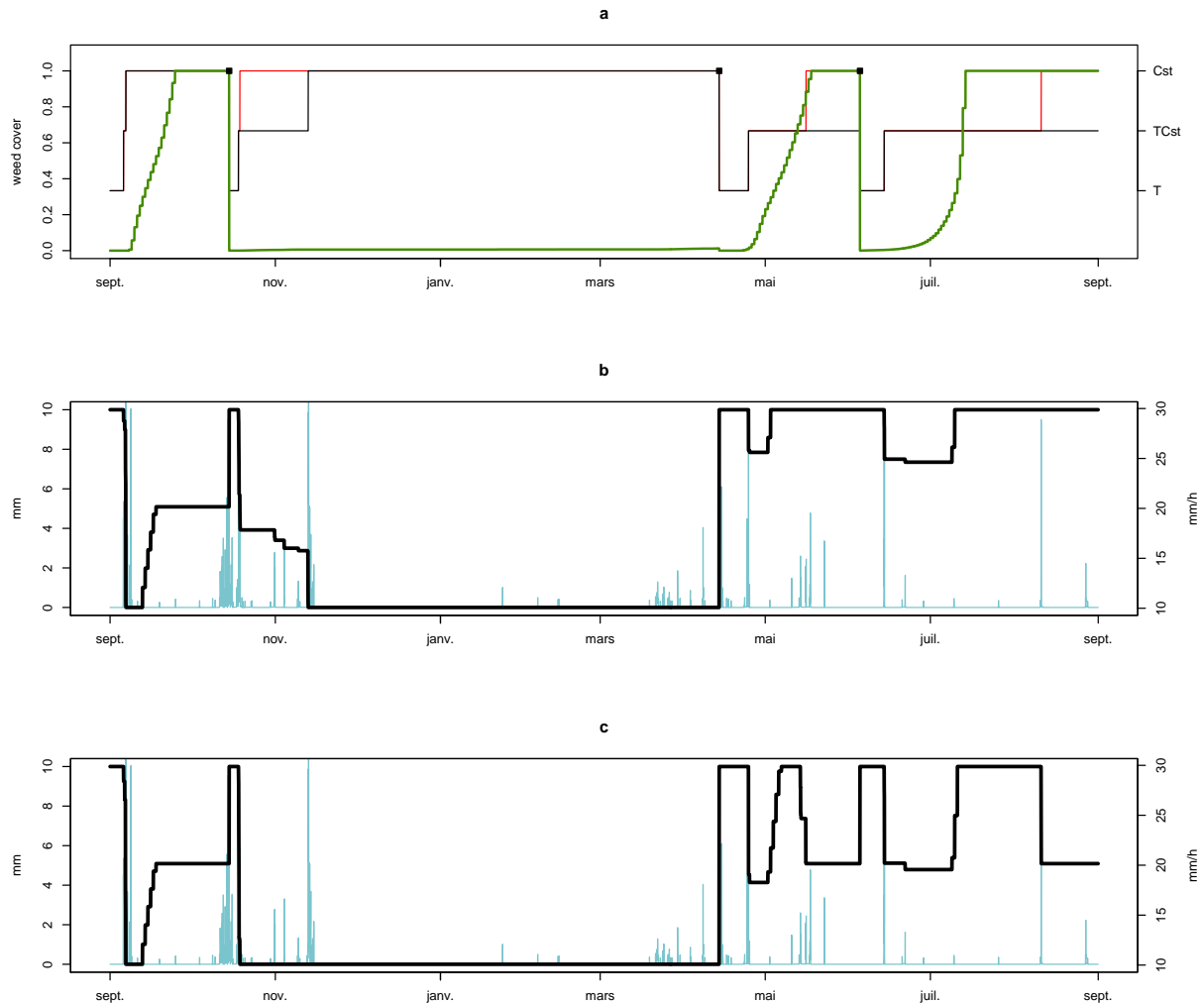


FIGURE 7.6 – Comparaison des évolutions des états de surface, du taux de couverture herbacée et de l'infiltrabilité entre un sol peu caillouteux et un sol très caillouteux entretenus par travail du sol.

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

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

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

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

7.3.5 Synthèse

Au total, on note plusieurs caractéristiques du modèle.

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

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

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

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

7.4 Conclusion

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

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

Remerciements

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