## 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 In	troduction
7.2 M	atériel et méthodes
7.2.	1 L'évolution de l'infiltrabilité dans le cadre de l'évolution des états de surface sur
	sols nus $\ldots \ldots \ldots$
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 con-
	tinue et consolidée
	7.2.2.2 Sur un état de surface ne présentant pas de croûte structurale consolidée206
7.2.	3 Contrôle de cohérence de la modélisation de l'évolution de l'infiltrabilité 207
7.3 R	esultats et discussion
7.3.	1 Itinéraire technique 1 : travail du sol (figures 1a et 1b)
7.3.	2 Itinéraire technique 2 : désherbage chimique (figures 2a et 2b)
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
7.3.	5 Synthèse
7.4 Ce	onclusion

# 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

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'occurence 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

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.



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

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 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.

$$\begin{array}{l} \text{Si } Tc < 25\%, \, K = K_{init} \, ; \\ \text{Si } 25\% \leqslant Tc \leqslant 50\%, \, K = min \left\{ K_{init} + (C \, K_{init} - K_{init}) \, \frac{(Tc - 25)}{(50 - 25)} \, , \, K_{max} \right\}; \\ \text{Si } Tc > 50\%, \, K = min \left\{ C \, K_{init} \, , \, K_{max} \right\}. \end{array}$$

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'infiltrabilitré, 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 sècheresse 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 desherbage 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 desherbage 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 herbacé 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 (*Diplotaxis erocoides*) a une température de base paramétrée à 10°C qui conduit à ne pas simuler de croissance hivernale. Or certaines espèces, et notamment *Diplotaxis 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 subisant 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 herbacée 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 developpement d'une modélisation complète des actions techniques en matière d'entretien du sol et de leur couplage avec le fonctionnement hydrologique du bassin versant.

### Remerciements

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

# Bibliographie

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