



**HAL**  
open science

## Modélisation Hydrologique Distribuée des AgroSystèmes - Eau et Pesticides

David Crevoisier, Cécile Dagès, Jean-Christophe Fabre, Sebastian  
Roman-Villafane, Marc Voltz

► **To cite this version:**

David Crevoisier, Cécile Dagès, Jean-Christophe Fabre, Sebastian Roman-Villafane, Marc Voltz. Modélisation Hydrologique Distribuée des AgroSystèmes - Eau et Pesticides. INRAE Montpellier - UMR LISAH. 2021, 148p. hal-04090048

**HAL Id: hal-04090048**

**<https://hal.inrae.fr/hal-04090048v1>**

Submitted on 5 May 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## MHYDAS-Pesticides version 1.0

Modélisation Hydrologique Distribuée des AgroSystèmes - Eau et Pesticides

D. Crevoisier, C. Dagès, J.-C. Fabre, S. Roman-Villafane et M.Voltz

décembre 10, 2021



# Table des matières

<b>Liste des abréviations et notations</b>	<b>4</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>9</b>
<b>2 Représentation spatiale</b>	<b>11</b>
<b>3 Représentation des forçages et des conditions initiales</b>	<b>14</b>
3.1 Forçages climatiques . . . . .	14
3.1.1 Pluviométrie . . . . .	14
3.1.2 Évapotranspiration potentielle . . . . .	14
3.1.3 Température de l'air . . . . .	15
3.1.4 Rayonnement global . . . . .	15
3.2 Forçages agronomiques . . . . .	15
3.2.1 Travail du sol . . . . .	15
3.2.2 Application de pesticides . . . . .	15
3.3 Forçages biologiques . . . . .	16
3.4 Conditions initiales . . . . .	17
3.4.1 d'ordre hydrologique . . . . .	17
3.4.2 d'ordre biogéochimique (solutés) . . . . .	17
3.4.3 autres conditions à la limite . . . . .	18
<b>4 Représentation de l'évolution de l'état de surface du sol et de sa capacité d'infiltration</b>	<b>18</b>
4.1 Typologie des états de surface du sol . . . . .	18
4.2 Représentation de l'évolution des états de surface suite à un travail du sol . . . . .	20
4.3 Représentation de l'évolution de la couverture du sol par les adventices . . . . .	22
4.3.1 Germination et émergence des adventices . . . . .	22
4.3.2 Croissance des adventices . . . . .	24
4.3.3 Effet des actions d'entretien du sol sur le couvert herbacé . . . . .	26
4.4 Estimation de la conductivité hydraulique à saturation de la surface du sol à partir des états de surface du sol . . . . .	27
<b>5 Représentation des processus hydrologiques</b>	<b>29</b>
5.1 Partition de l'évapotranspiration potentielle et calcul de l'évapotranspiration réelle . . . . .	30
5.2 Transfert d'eau dans les sols (infiltration) et genèse du ruissellement . . . . .	31
5.2.1 Les équations de transfert d'eau . . . . .	32
5.2.2 Principes généraux de la méthode de résolution . . . . .	33
5.3 Écoulements de surface sur les parcelles . . . . .	34
5.4 Écoulements sur les routes . . . . .	36
5.5 Écoulements dans le réseau hydrographique . . . . .	36
5.5.1 Ecoulements de surface dans le réseau hydrographique . . . . .	37
5.5.2 Bilan hydrique simplifié . . . . .	38
<b>6 Représentation des processus de devenir des pesticides</b>	<b>40</b>
6.1 Distribution de l'application . . . . .	40

6.2	Devenir dans le couvert végétal . . . . .	41
6.2.1	Lessivage foliaire . . . . .	41
6.2.2	Dégradation . . . . .	42
6.3	Devenir dans le sol . . . . .	42
6.3.1	L'équation de transport réactif des pesticides . . . . .	42
6.3.2	Flaquage en surface et hypothèse de mélange uniforme . . . . .	43
6.3.3	Principes de résolution . . . . .	44
6.4	Devenir dans les écoulements de surface sur les parcelles . . . . .	44
6.4.1	Mobilisation . . . . .	44
6.4.2	Propagation . . . . .	44
6.5	Devenir dans les écoulements de surface sur les routes . . . . .	45
6.6	Devenir dans le réseau hydrographique . . . . .	45
6.6.1	Dégradation . . . . .	45
6.6.2	Transport . . . . .	45
6.6.3	Sorption . . . . .	46
<b>7</b>	<b>Couplage des processus</b>	<b>50</b>
7.1	Principes généraux du couplage . . . . .	50
7.2	Pas de temps variable . . . . .	53
	<b>Annexe A : base de données des espèces d'adventices</b>	<b>54</b>
	<b>Annexe B : valeurs de la régression logistique et seuils d'énergie cinétique de la pluie</b>	<b>55</b>
	<b>Annexe C : relation empirique de la fraction de couverture végétale pour différents types d'équipement</b>	<b>56</b>
	<b>Références</b>	<b>57</b>

## Liste des abréviations et notations

- $\alpha_{ETo}$  : coefficient d'extinction pour la partition de l'*ETo*.
- $\alpha_i^*$  : coefficient de distribution de l'évaporation du compartiment  $i$  ( $m^{-1}$ ),  $i$  pouvant être le compartiment superficiel ou profond.
- $\alpha$  : coefficient d'extinction pour le partage de *pop* entre le sol et les feuilles.
- $\bar{i}$  : flux d'infiltration moyen du fossé ( $m s^{-1}$ ).
- $\beta_m$  : moyennes des pentes  $\beta$  d'une classe d'unité spatiale (SU, RS ou RU) ( $m m^{-1}$ ).
- $\beta$  : qualité de réglage de l'équipement.
- $\beta$  : pente moyenne de l'unité spatiale (SU, RS ou RU) ( $m m^{-1}$ ).
- $\Delta S e_{\max}$  : variation d'humidité relative maximale admise.
- $\Delta t$  : pas de temps ( $s$ ).
- $\Delta z_i$  : épaisseur de la strate du sol d'incide  $i$  ( $m$ ).
- $\Delta z$  : résolution spatiale verticale de la paroi du bief ( $m$ ).
- $\Delta \theta$  : stockage d'eau maximum dans le sol ( $m^3 m^{-3}$ ).
- $\eta_a$  : efficience de l'application de *pop* sur la sous-unité spatiale de surface.
- $\mathcal{A}$  : coefficient de stress d'eau.
- $\mathcal{B}$  : densité relative de racines.
- $\Psi_{min}$  : potentiel hydrique de base ou minimal du sol pour la germination de l'espèce herbacée (*MPa*).
- $\Psi_d$  : potentiel hydrique moyen journalier du sol (*MPa*).
- $\rho_a$  : densité potentielle de graines de l'espèce herbacée au début de la saison de germination ( $m^{-2}$ ).
- $\rho_{bulk}$  : densité apparente du sol (-).
- $\sigma_R$  : coefficient de linéarisation des flux selon la méthode de Ross ( $[0, 1]$ ).
- $\sigma(\Psi_{min})$  : écart type de  $\Psi_{min}$ .
- $\tau$  : opérateur d'indice de temps interne de la convolution ( $s$ ).
- $\theta_{HT_d}$  : temps hydrothermal journalier pour la germination de l'espèce herbacée (*MPa K*).
- $\theta_{ref}$  : teneur en eau de référence ( $m^3 m^{-3}$ ).
- $\theta_R$  : teneur en eau résiduelle dans le sol ( $m^3 m^{-3}$ ).
- $\theta_S$  : teneur en eau à saturation dans le sol ( $m^3 m^{-3}$ ).
- $\theta$  : valeur moyenne de la teneur en eau dans le sol ( $m^3 m^{-3}$ ).
- $A_{cst}$  : constante allométrique de l'espèce herbacée ( $m^2 g^{-2/3}$ ).
- $A_{RS}$  : aire de l'unité de bief ( $m^2$ ).
- $A_{SU}$  : aire de l'unité spatiale de surface ( $m^2$ ).
- $A_{SubSU,i-r}$  : aire de la sous-unité spatiale de surface dénommée inter-rang ( $m^2$ ).
- $A_{SubSU,r}$  : aire de la sous-unité spatiale de surface dénommée rang ( $m^2$ ).
- $A_{SubSU}$  : aire de la sous-unité spatiale de surface ( $m^2$ ).
- $a$  : paramètre empirique du métamodèle d'infiltration dans les biefs fixé à 1.58 (-).
- $A$  : seuil d'énergie cinétique cumulée depuis le dernier travail du sol pour produire un changement de  $SSC_T$  à ( $J m^{-2}$ ).
- $b$  : paramètre empirique du métamodèle d'infiltration dans les biefs fixé 1.64e-5 ( $m s^{-1}$ ).
- $b$  : coefficient de Walker (-).
- $B$  : seuil d'énergie cinétique cumulée depuis le dernier travail du sol pour produire un changement de à  $SSC_{Cst}$  ( $J m^{-2}$ ).
- $Bad_{max}$  : valeur de référence expérimentale maximale pour un mauvais réglage de l'équipement.

$Bad_{min}$  : valeur de référence expérimentale minimale pour un mauvais réglage de l'équipement.  
 $C_{eq,WS}$  : concentration massique à l'équilibre dans le compartiment en interaction avec la surface mouillée ( $kg\ m^{-3}$ ).  
 $C_{K_s,V}$  : coefficient multiplicatif de la conductivité hydraulique à saturation pour un sol enherbé.  
 $C_{rough}$  : classe de rugosité du sol.  
 $C_{ston}$  : classe de pierrosité du sol.  
 $C_1$  : premier paramètre calculé pour l'estimation des probabilités de  $SSC$ .  
 $C_2$  : deuxième paramètre calculé pour l'estimation des probabilités de  $SSC$ .  
 $C_u$  : célérité d'onde moyenne d'une classe d'unité spatiale (SU, RS ou RU) ( $m\ s^{-1}$ ).  
 $C$  : célérité d'onde ( $m\ s^{-1}$ ).  
 $D_{bot}$  : hauteur d'eau drainée depuis le compartiment profond du sol d'un bief ( $m$ ).  
 $D_{top}$  : hauteur d'eau drainée entre le compartiment superficiel et le compartiment profond du sol d'un bief ( $m$ ).  
 $d_f$  : distance entre les centres de gravité des deux unités spatiales ( $m$ ).  
 $d_i$  : densité du substrat  $i$  (-).  
 $D_u$  : diffusivité moyenne d'une classe d'unité spatiale (SU, RS ou RU) ( $m^2\ s^{-1}$ ).  
 $D$  : diffusivité d'onde ( $m^2\ s^{-1}$ ).  
 $d$  : indice du jour de simulation.  
 $DT50_i$  : temps de demi-vie dans le matériau  $i$  ( $days$ ).  
 $e_{bot}$  : épaisseur du compartiment profond ( $m$ ).  
 $E_{int}$  : hauteur de pluie interceptée par le couvert des plantes qui ne rejoint jamais le sol ( $m$ ).  
 $e_{top}$  : épaisseur du compartiment superficiel ( $m$ ).  
 $e_i$  : épaisseur du substrat  $i$  ( $m$ ).  
 $E_k$  : énergie cinétique de la pluie ( $J\ m^{-2}\ mm^{-1}$ ).  
 $E_P$  : taux d'évaporation potentielle ( $m^3\ m^{-3}\ s^{-1}$ ).  
 $E_s$  : évaporation potentielle ( $m$ ).  
 $EDD$  : degrés-jours effectifs pour l'espèce herbacée ( $EDD$ ).  
 $ET_o$  : évapotranspiration potentielle ou de référence ( $m$ ).  
 $f_{gc_{max}}$  : fraction de couverture végétale maximale.  
 $f_{gc_{min}}$  : fraction de couverture végétale minimale.  
 $f_{gc}$  : fraction de couverture végétale.  
 $F_z$  : coefficient de lumière interceptée par le feuillage dans  $S_z$ .  
 $fs_i$  : taux de couverture du bief par le substrat  $i$  (-).  
 $g_d$  : taux de germination journalier de l'espèce herbacée.  
 $Good_{max}$  : valeur de référence expérimentale maximale pour un bon réglage de l'équipement.  
 $Good_{min}$  : valeur de référence expérimentale minimale pour un bon réglage de l'équipement.  
 $h_s$  : épaisseur de sol en interaction avec l'eau et les pesticides sur la surface mouillée ( $m$ ).  
 $h_w$  : épaisseur de la lame d'eau libre interagissant avec la surface mouillée ( $m$ ).  
 $h$  : pression matricielle dans le sol ( $m$ ).  
 $H$  : hauteur de la lame d'eau à la surface du sol ( $m$ ).  
 $I_{RR}$  : intensité de pluie ( $mm\ h^{-1}$ ).  
 $i$  : sous-indice pour les strates du sol.  
 $IP$  : infiltration potentielle du fossé ( $m^3\ s^{-1}$ ).

$IR$  : infiltration réelle du fossé ( $m^3 s^{-1}$ ).  
 $k_{E_k}$  : coefficient d'ajustement de l'énergie cinétique pour calculer  $C_1$  et  $C_2$ .  
 $k_{grow}$  : coefficient d'extinction pour la croissance de l'espèce herbacée.  
 $K_{s_{RS}}$  : conductivité hydraulique à saturation du sol du fossé ( $m s^{-1}$ ).  
 $K_{s_z}$  : conductivité hydraulique à saturation dans le sol ( $m s^{-1}$ ).  
 $K_{s,max}$  : conductivité hydraulique à saturation maximale de la surface du sol ( $m s^{-1}$ ).  
 $K_{s,min}$  : conductivité hydraulique à saturation minimale de la surface du sol ( $m s^{-1}$ ).  
 $K_1$  : premier coefficient d'ajustement pour l'estimation des probabilités de  $SSC$ .  
 $K_2$  : deuxième coefficient d'ajustement pour l'estimation des probabilités de  $SSC$ .  
 $k_m$  : durée de propagation d'une onde de translation simple.  
 $K_s$  : conductivité hydraulique à saturation de la surface du sol ( $m s^{-1}$ ).  
 $K_z$  : conductivité hydraulique dans le sol ( $m s^{-1}$ ).  
 $K(t)$  : noyau d'Hayami.  
 $k$  : valeur constante associée à  $LAI_{c,max}$  pour l'estimation de  $f_{gc}$ .  
 $k1_{rough}$  : coefficient d'ajustement de la rugosité pour calculer  $C_1$ .  
 $k1_{ston}$  : coefficient d'ajustement de la pierrosité pour calculer  $C_1$ .  
 $k2_{rough}$  : coefficient d'ajustement de la rugosité pour calculer  $C_2$ .  
 $k2_{ston}$  : coefficient d'ajustement de la pierrosité pour calculer  $C_2$ .  
 $Kd_i$  : coefficient de sorption d'un pesticide dans le substrat  $i$  ( $kg$ ).  
 $Kdisp_i$  : coefficient de dispersion du matériau  $i$  ( $s^{-1}$ ).  
 $L_r$  : profondeur racinaire ( $m$ ).  
 $L$  : longueur du bief ( $m$ ).  
 $LAI_{c,max}$  : indice de surface foliaire maximum de la culture ( $m^2 m^{-2}$ ).  
 $LAI_{SubSU}$  : indice de surface foliaire total de la sous-unité de surface ( $m^2 m^{-2}$ ).  
 $LAI_c$  : indice de surface foliaire de la culture ( $m^2 m^{-2}$ ).  
 $LAI_w$  : indice de surface foliaire des toutes les adventices ou espèces herbacées ( $m^2 m^{-2}$ ).  
 $LAI$  : indice de surface foliaire ( $m^2 m^{-2}$ ).  
 $LAR$  : surface foliaire par unité de masse de l'espèce herbacée ( $m^2 g^{-1}$ ).  
 $M_{soil}$  : masse de sol à l'équilibre ( $kg$ ).  
 $m_a$  : masse effective de  $pop$  appliqué sur la sous-unité spatiale de surface ( $kg$ ).  
 $m_f$  : masse effective de  $pop$  appliquée sur la culture de la sous-unité spatiale de surface ( $kg$ ).  
 $M_i$  : masse du substrat  $i$  à l'équilibre ( $kg$ ), avec  $i$  pouvant être de la litière (distinction possible entre litière peu transformée constituée de tiges, litière peu transformée constituée de feuilles, litières fortement décomposé (voir Dollinger et al. (2016) pour plus de détails)), des cendres ou de la végétation vivante.  
 $m_s$  : masse effective de  $pop$  appliquée sur le sol de la sous-unité spatiale de surface ( $kg$ ).  
 $n_{sd}$  : nombre de jours à partir du début de la germination de l'espèce herbacée.  
 $n_m$  : coefficient de rugosité Manning moyen de toutes les unités spatiales de surface ( $s m^{-1/3}$ ).  
 $n$  : coefficient de rugosité Manning de l'unité spatiale de surface (en amont) ( $s m^{-1/3}$ ).  
 $P_{banks}$  : masse de pesticide stockée dans la paroi et participant à l'équilibre ( $kg$ ).  
 $P_{inf}$  : masse de pesticides s'infiltrant ( $kg$ ).  
 $P_{LV,water}$  : masse de pesticide dans l'eau circulante du compartiment en interaction avec la végétation ( $kg$ ).  
 $P_{deg}$  : masse de pesticide dégradée dans un bief entre les temps  $t - 1$  et  $t$  ( $kg$ ).  
 $P_{inf}$  : masse de pesticide infiltrée dans un bief ( $kg$ ).

$P_{sorb}$  : masse de pesticide sorbée dans un bief ( $kg$ ).

$P_{WL,water}$  : masse de pesticide dans l'eau circulant du compartiment en interaction avec la surface mouillée ( $kg$ ).

$P_i$  : masse totale de pesticide stockée dans le substrat  $i$  d'un bief et participant à l'équilibre ( $kg$ ),  $i$  pouvant être le sol (*soil*), les litières (*litter*) ou la végétation vivante (*LV*).

$p_i$  : porosité du substrat  $i$  (-).

$pop$  : polluant organique persistant.

$Q_{in_{RS}}$  : débit à l'entrée du bief ( $m^3 s^{-1}$ ).

$q_{inf}^*$  : flux potentiel d'infiltration sur l'aire mouillée du bief ( $m s^{-1}$ ).

$q_{inf}$  : flux d'infiltration moyen sur l'aire mouillée du bief ( $m s^{-1}$ ).

$Q_{out_{RS}}^*$  : débit théorique sortant du bief en surface en l'absence d'infiltration ( $m^3 s^{-1}$ ).

$Q_{out_{RS}}$  : débit sortant dans un bief ( $m^3 s^{-1}$ ).

$Q_{R_{RS}}$  : débit d'eau à la sortie du fossé en prenant en compte l'infiltration réelle ( $m^3 s^{-1}$ ).

$Q_{s,in_{RS}}$  : débit massique entrant dans un bief ( $kg s^{-1}$ ).

$Q_{SU}(t)$  : débit d'eau propagé par l'unité de surface en amont à l'instant  $t$  ( $m^3 s^{-1}$ ).

$q_{evap}$  : intensité de l'évaporation ( $m s^{-1}$ ).

$q_{prec}$  : intensité des précipitations ( $m s^{-1}$ ).

$Q_s^*$  : débit massique propagé sous l'hypothèse de transport conservatif ( $kg s^{-1}$ ).

$q^W$  : flux d'eau dans le sol ( $m s^{-1}$ ).

$Q$  : débit d'eau propagé ( $m^3 s^{-1}$ ).

$q$  : flux d'eau latéraux ( $m^3 s^{-1}$ ).

$R_a$  : masse par unité de surface de  $pop$  appliqué sur la sous-unité spatiale ( $kg m^{-2}$ ).

$R$  : rayon hydraulique du bief (m).

$Rg_d$  : rayonnement global journalier ( $MJ m^{-2}$ ).

$RGR$  : taux de croissance relatif par jour de l'espèce herbacée ( $EDD^{-1}$ ).

$RR_{SubSU,i-r}$  : hauteur de pluie sur l'inter-rang ( $m^2$ ).

$RR_{SubSU,r}$  : hauteur de pluie sur le rang ( $m^2$ ).

$RR$  : hauteur de pluie ( $mm$ ).

$S_{banks,i}$  : stock en pesticides stockés dans la cellule  $i$  de la paroi ( $kg$ ).

$S_{w,bot}^{max}$  : stock en eau maximal dans le compartiment profond du sol d'un bief ( $m$ ), correspondant au stock en eau à la teneur à saturation.

$S_{w,bot}$  : stock en eau dans le compartiment profond du sol d'un bief ( $m$ ).

$S_{w,top}^{max}$  : stock en eau maximal dans le compartiment superficiel du sol d'un bief ( $m$ ), correspondant au stock en eau à la teneur à saturation

$S_{w,top}$  : stock en eau dans le compartiment superficiel du sol d'un bief ( $m$ ).

$S_i$  : stock en pesticide dans le matériau  $i$  ( $kg$ ).

$S_l$  : aire foliaire de l'espèce herbacée ( $m^2$ ).

$S_P$  : taux d'absorption d'eau potentiel ( $m^3 m^{-3} s^{-1}$ ).

$S_w^{max}$  : stock en eau maximal dans le sol d'un bief ( $m$ ), correspondant au stock en eau à la teneur à saturation.

$S_w^{min}$  : stock en eau minimal dans le sol d'un bief ( $m$ ), correspondant au stock en eau à la teneur résiduelle.

$S_z$  : aire de couronne foliaire de l'espèce herbacée ( $m^2$ ).

$SC_{total}$  : indice de couverture du sol par l'ensemble des espèces herbacées de la sous-unité de surface ( $m^2 m^{-2}$ ).

$SC$  : indice de couverture du sol par une espèce herbacée ( $m^2 m^{-2}$ ).



$Se$  : teneur en eau effective.  
 $Sk^W$  : terme de puits ou de source dans le sol ( $m^3 m^{-3} s^{-1}$ ).  
 $SS$  : degré de saturation du sol (-).  
 $SSC_{Cst}$  : état de surface du sol avec croûte structurale.  
 $SSC_T$  : état de surface du sol travaillé.  
 $SSC_{TCst}$  : état de surface du sol travaillé avec une légère croûte structurale.  
 $SSC_{VCst}$  : état de surface du sol avec végétation et croûte structurale.  
 $SSC$  : état de surface du sol.  
 $T_{germ_{min}}$  : température de base ou minimale pour la germination de l'espèce herbacée ( $K$ ).  
 $T_{grow_{min}}$  : température de base ou minimale pour la croissance de l'espèce herbacée ( $C$ ).  
 $T_d$  : température journalière ( $K$ ).  
 $T_P$  : taux de transpiration potentielle ( $m^3 m^{-3} s^{-1}$ ).  
 $T_R$  : taux de transpiration réelle ( $m s^{-1}$ ).  
 $T_s$  : température du sol ( $C$ ).  
 $T$  : température de l'air ( $C$ ).  
 $t$  : temps ( $s$ ).  
 $Tr_{PB}$  : transmissivité d'eau à la base de la plante.  
 $Tr_{SN}$  : transmissivité d'eau au sol nu.  
 $w_0$  : poids sec initial de l'espèce herbacée ( $g$ ).  
 $w_d$  : poids sec journalier de l'espèce herbacée ( $g$ ).  
 $w$  : largeur du bief (RS) ( $m$ ).  
 $z_i$  : profondeur au centre du compartiment  $i$  ( $m$ ).  
 $Z$  : nombre adimensionnel caractérisant la diffusivité de l'écoulement.  
 $z$  : profondeur de la colonne du sol.

# 1 Introduction

La gestion de la qualité des eaux est un enjeu primordial dans les bassins versants ou aires de captages en eau potable, occupés en majorité par des systèmes cultureux ayant recours aux pesticides. Le diagnostic des risques de contamination en fonction des pratiques de protection phytosanitaire en cours dans les bassins versants, mais aussi des spécificités climatiques, pédologiques et hydrologiques de ces bassins est un exercice difficile du fait de la multiplicité des processus physiques, chimiques et biologiques en jeux et de leur dépendance aux propriétés intrinsèques et à l'anthropisation des milieux concernés. Il en est de même pour la conception de nouvelles pratiques de protection phytosanitaires diminuant l'impact de l'usage des pesticides sur les ressources en eau. Les approches de modélisation du fonctionnement hydro-chimique des bassins versants sont à cet égard des outils potentiels pour mieux évaluer les relations usage-impact des pesticides et ainsi aider aux besoins de diagnostic et re-conception des systèmes agricoles en termes d'impacts sur la ressource en eau.

C'est dans cet esprit qu'a été initiée en 1995 l'approche de modélisation hydrologique distribuée MHYDAS (Modélisation Hydrologique Distribuée des AgroSystèmes) dont le principe de base est d'intégrer de manière équilibrée la représentation de l'espace physique dans et sur lequel se développent les flux, la représentation des mécanismes à l'origine des flux et la représentation des actes techniques agricoles qui influencent conjointement les propriétés de l'espace physique et l'expression des mécanismes de flux. L'approche est originale dans la mesure où la plupart des modélisations hydrologiques distribuées en cours au plan international lors du démarrage du projet MHYDAS avaient été développées sur la base d'une représentation topologique de l'espace peu adaptées à celle nécessaire pour un milieu cultivé. Les exemples de modèles emblématiques de ce type sont TOPMODEL (Beven et Kirkby, 1979), Système Hydrologique Européen (SHE) (Abbott et al., 1986 ;), KINEROS (Woolhiser et al., 1990), TOPOG (Vertessy et al., 1993). Seul SWAT (Arnold et al., 1998) développé par l'USDA présente une philosophie comparable à la nôtre, mais avec une topologie et une phénoménologie simplifiées. Depuis 2000 plusieurs versions de MHYDAS ont été développées. La version initiale consistait en un modèle hydrologique évènementiel permettant de simuler les crues sur un bassin versant présentant une hétérogénéité de pratiques d'entretien du sol (Moussa et al., 2000 ; Moussa et al ; 2002 ; Chahinian, 2004). Des versions ultérieures étendaient le modèle évènementiel à la simulation des processus de transfert de surface des pesticides (MHYDAS-Pesticides-0.x : Bouvet et al., 2010) et d'érosion (MHYDAS-Erosion : Gumières et al. ; 2011). Ces nouvelles versions ont été développées sur la plateforme logicielle d'aide à la modélisation des flux dans les paysages OpenFLUID (Fabre et al., 2010) afin de favoriser la modularité de la modélisation et faciliter le couplage de nouveaux processus spatiaux. En ce qui concerne MHYDAS-Pesticides, depuis 2010 différents ajouts de processus et de fonctionnalités ont été apportés aux versions 0.x lors d'applications spécifiques du modèle mais aucune nouvelle version de MHYDAS n'a été formalisée permettant de vérifier la complémentarité des ajouts et d'en valider la pertinence. Par ailleurs, les versions 0.x avaient été développées sous la version 1.7.2 d'OpenFLUID qui a évolué vers une version 2.1.11 présentant des changements nécessitant une adaptation des codes développés dans la version antérieure.

Dans le cadre du projet FEDER-PollDiff, soutenu par l'AAP READYNOV de la région Occitanie et l'Union Européenne, une nouvelle version 1.0 de MHYDAS-Pesticides a été élaborée. Elle a pour objectif de constituer une version opérationnelle aidant au diagnostic des facteurs de contamination des eaux sur des bassins versants pilotes disposant d'une base de données de caractérisation et de suivi des contaminations. Cette version 1.0 met à niveau MHYDAS-Pesticides sous OpenFLUID-2.1.11, capitalise l'ensemble des modifications initiées depuis 2010 et introduit un ensemble de nouvelles fonctionnalités. Le présent document détaille les concepts

de représentation d'un bassin versant agricole par MHYDAS, les mécanismes et paramètres représentés dans MHYDAS-Pesticides-1.0 et fournit un exemple d'application dans le cas d'un bassin versant viticole. Les principales nouvelles fonctionnalités de cette version 1.0 par rapport à la version antérieure sont les suivantes :

- passage consolidé à une version continue de la modélisation qui simule à présent également les processus inter-cruce au plan des flux hydrologiques et de solutés (évapotranspiration, percolation, dégradation,...),
- représentation de l'évolution de l'infiltrabilité des sols en fonction des opérations de gestion agricole des sols, du développement des adventices et de la pluviométrie,
- représentation possible de cultures en rang et cultures associées avec distinction de modes différents de gestion des rangs au sein d'une même parcelle agricole,
- représentation du processus de transfert des pesticides dans les sols,
- représentation des capacités d'infiltration et de rétention des pesticides par les fossés agricoles en fonction des états des fossés,
- introduction d'un pas de temps variable de calcul en fonction des évènements hydrologiques afin d'optimiser le temps calcul des simulations.

Ainsi la version 1.0 de MHYDAS-Pesticides permet la simulation du devenir hydrologique d'une molécule pesticide consécutive à son épandage dans un paysage cultivé hétérogène présentant des flux de ruissellement Hortonien prépondérants et des évolutions des propriétés de la couche de surface du sol sous l'effet des actions de gestion des sol. Les paramétrisations actuellement disponibles de la modélisation s'appliquent en priorité au cas des cultures viticoles, mais peuvent être étendues au cas plus général des cultures en rangs avec ou sans enherbement associé.

La figure 1 synthétise les principaux processus représentés dans MHYDAS-Pesticides-1.0

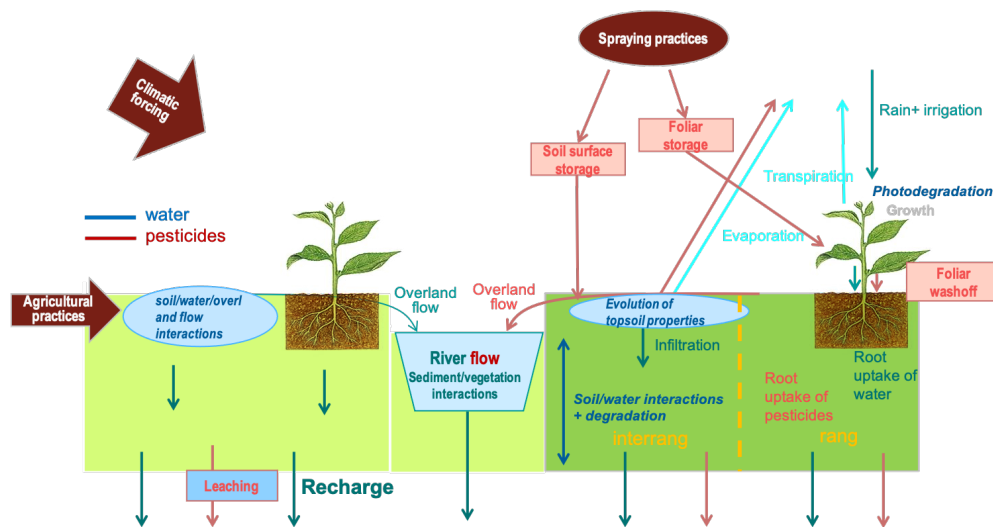


FIGURE 1 – Schéma des processus principaux représentés dans MHYDAS-Pesticides.

## 2 Représentation spatiale

MHYDAS-Pesticides est un modèle hydrologique distribué spatialement explicite. Il s'appuie sur la même représentation spatiale que MHYDAS, telle que décrite dans Moussa et al. (2002) et Lagacherie et al. (2010), dont les principaux éléments sont rappelés ici.

- L'espace est représenté par un ensemble d'objets paysagers dont MHYDAS définit les connections hydrologiques.
- Les objets actuellement pris en compte dans MHYDAS-Pesticides sont les éléments du parcellaire, le réseau hydrographique, les routes, le sol et sa stratification verticale. Sous réserves d'une paramétrisation adaptée, les éléments du parcellaire peuvent représenter des parcelles agricoles, des prairies, des bandes enherbées, des plantations forestières, des espaces mixtes à motifs réguliers,...
- La segmentation de l'espace appliquée dans MHYDAS-Pesticides vise à identifier les limites surfaciques correspondantes aux objets cités et aboutit à la distinction d'un ensemble d'unités spatiales de natures et de formes variables. la segmentation est effectuée par croisement de couches d'information géographique représentant les principales hétérogénéités étudiées du paysage cultivé : la topographie, le parcellaire, la carte des sols, le réseau hydrographique.<sup>1</sup>
- Chaque unité spatiale est supposée être uniforme du point de vue de ses propriétés pédologiques et du forçage climatique. Un seul exutoire vis à vis des écoulements de surface lui est attribué.
- Les liens topologiques entre les unités sont définis à partir de la direction générale des écoulements de surface d'une unité spatiale vers une autre.
- Les unités spatiales sont catégorisées par type d'objet représenté.
  - Les unités de surface (*SU*) sont des unités spatiales surfaciques issues du croisement entre parcellaire, limites de sol et de bassins-versant. Ainsi, une parcelle peut être représentée par une ou plusieurs *SU*.
  - Les sous-unités de surface (*SubSU*) correspondent à la distinction d'hétérogénéités intra *SU* présentant des motifs réguliers, tels que la succession de rangs et d'inter-rangs dans les parcelles de vigne ou en arboriculture. Ces sous-unités ne sont pas définies de façon spatialement explicite. Ainsi, une *SubSU* regroupe toutes les surfaces d'une *SU* appartenant au même motif et présentant les mêmes propriétés. La superficie associée à une *SubSU* cumule donc la surface de chacune des surfaces identiques.
  - Les unités de route (*RU*) sont issues de la délimitation des routes.<sup>2</sup>
  - Les biefs ou tronçons de fossé (*RS*) sont issus de l'identification du réseau hydrographique.
  - Les unités souterraines (*GU* ou *GRS*)<sup>3</sup> représentent le domaine souterrain et sont délimitées au plan surfacique de la même façon que les unités de type *SU*, *SubSU* et *RS*. Elles représentent les profils de sol sous-jacents aux unités de surface. En outre, les unités souterraines *GU* et *GRS* sont également découpées au plan vertical pour les besoins de la modélisation de certains processus,

---

1. Dans la pratique, pour limiter la création de toutes petites unités spatiales qui conduiraient à augmenter les temps de calculs mais surtout qui engendreraient de la dispersion numérique, le pas de temps étant le même pour toutes les unités spatiales d'une même classe, certaines unités spatiales peuvent être fusionnées. La règle est cependant de conserver l'intégrité du réseau hydrographique et, pour les petits bassins versants, les limites de parcelles.

2. Selon les outils de segmentation et/ou les couches d'information géographique utilisées pour faire le découpage, les unités de routes peuvent dans un premier temps être assimilées à des *SU*. Une option disponible dans les prétraitements de MHYDAS-Pesticides permet de les transformer en *RU*, si les *SU* ont un attribut spatial nommé *LandUse* avec comme valeur 'road' pour les routes.

3. Deux étiquettes sont associées aux unités souterraines selon leur connexion avec la surface. Une *GU* est associée à une *SU* ou *SubSU* tandis qu'une *GRS* est associée à une *RS*.

selon des modalités décrites dans les sections dédiées, 5.2.2 et 5.5.2

- Les couches de sol ( $SL$ ) correspondent aux horizons de sol distingués dans les différents sols du bassin. Elles sont mises en correspondance avec les strates de la discrétisation verticale des unités souterraines ( $GU$  ou  $GRS$ ).

La figure 2 schématise sur un exemple simple les unités mentionnées et leurs dispositions relatives.

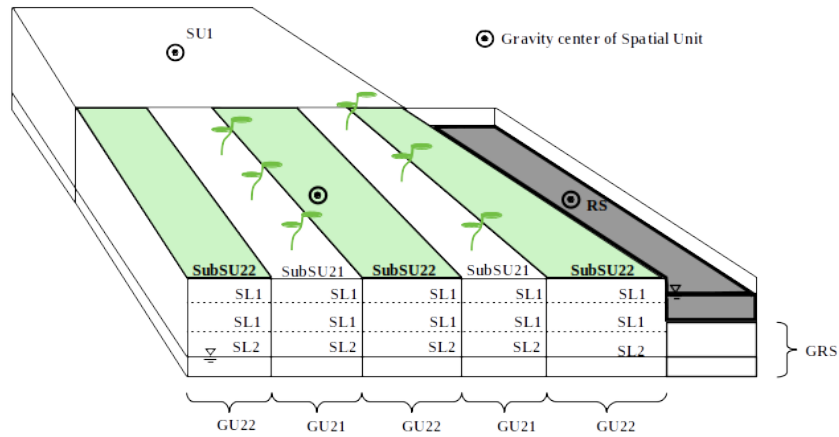


FIGURE 2 – Schéma de segmentation du paysage en unités spatiales.

La segmentation du paysage en unités spatiales et la détermination de la connectivité (topologie) peuvent être déterminées à dire d'expert ou avec des outils dédiés (e.g. Geo-MHYDAS (Lagacherie et al. 2010) ou GroovScape). Le résultat doit prendre la forme d'un graphe où les noeuds représentent les unités spatiales et les arcs leur connexion (Fabre et al. 2010 ; Lagacherie et al. 2010) (voir exemples en figures 3 et 4) .

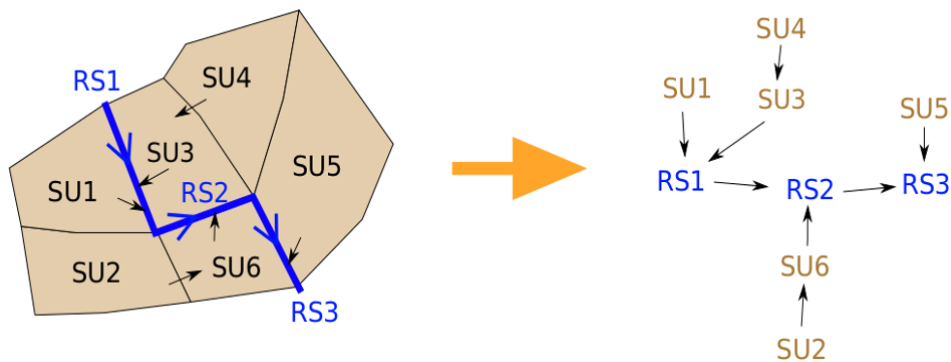


FIGURE 3 – exemple simplifié de construction d'un graphe de connectivité.

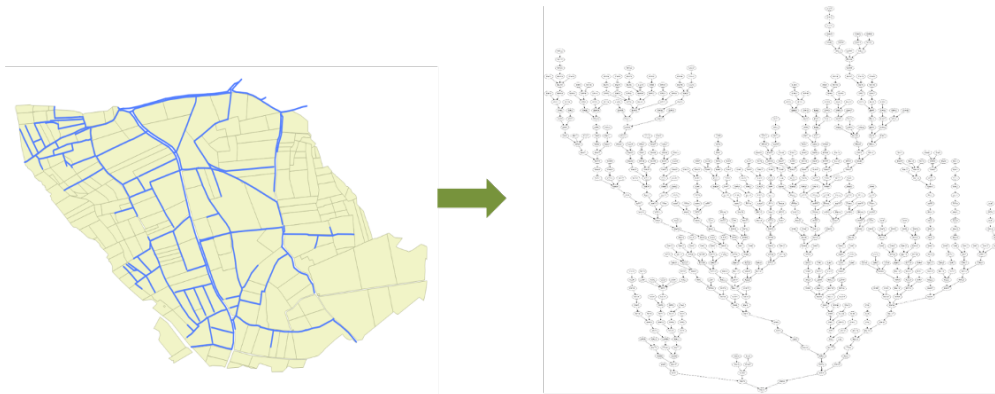


FIGURE 4 – exemple du graphe des connectivités sur le bassin de Roujan (ORE OMERE).

Les connexions entre unités spatiales prises en compte dans MHYDAS-Pesticides peuvent être les suivantes :

- lien topologique :
  - $SU$  vers  $SU$  ou  $RU$  ou  $RS$
  - $RU$  vers  $SU$  ou  $RU$  ou  $RS$
  - $RS$  vers  $RS$
- lien d'appartenance :
  - $SubSU$  à  $SU$
  - $GU$  à  $SU$  ou  $SubSU$
  - $GRS$  à  $RS$
  - $SL$  à  $GU$  ou  $GRS$

Les liens topologiques définissent le sens des écoulements en surface tel que détaillés dans la section 5.3. Une unité spatiale avec une extension à la surface du sol ( $SU$ ,  $RU$  ou  $RS$ ) peut avoir plusieurs unités en amont mais une seule unité ( $SU$ ,  $RU$  ou  $RS$ ) comme exutoire pour les écoulements de surface. Par construction, une unité souterraine ( $GU$  ou  $GRS$ ) n'est reliée qu'à une seule unité spatiale de type  $SU$  ou  $SubSU$ ,  $RU$  et  $RS$ , et vice versa ; elle peut être composée d'une ou plusieurs  $SL$ .

Chaque classe d'unité spatiale porte des paramètres la décrivant. On les désigne ici par le terme "attribut spatial" pour les différencier des paramètres globaux du modèle, c'est-à-dire ne dépendant pas de l'espace (ex. paramètre numérique de résolution de l'équation de transfert dans les milieux variablement saturés). Si un attribut est défini sur une classe d'unité, tous les éléments de la classe doivent être renseignés. Par exemple, la superficie,  $A_{SU}$ , est un attribut spatial de la classe d'unité de surface ( $SU$ ) et en conséquence, une valeur de superficie doit être renseignée pour toutes les  $SU$ . Les différents attributs spatiaux nécessaires à MHYDAS-Pesticides sont présentés dans la suite au fur à mesure de la description du modèle.

#### Note

- MHYDAS-Pesticides a été développé pour simuler les écoulements d'eau et de pesticides dans les bassins versants agricoles. Pour autant, si seules certaines composantes de MHYDAS-Pesticides sont mises en oeuvre, le domaine modélisé peut se réduire à une combinaison d'une ou plusieurs parcelles et/ou une combinaison d'une ou plusieurs portions de réseau hydrographique. Dès que des éléments du réseau hydrographique sont modélisés, le domaine doit comporter un unique exutoire.

## 3 Représentation des forçages et des conditions initiales

Les forçages représentent dans le modèle l'évolution des conditions aux limites du bassin versant ainsi que la nature et la chronologie des actions anthropiques susceptibles d'influer sur les flux d'eau et de pesticides simulés. Ces forçages sont classés en trois types : climatiques, agronomiques et biologiques.

### 3.1 Forçages climatiques

Les informations climatiques requises par le modèle sont la pluviométrie, l'évapotranspiration potentielle, la température et le rayonnement global. MHYDAS-Pesticides offre à l'utilisateur la possibilité de renseigner ces données à l'échelle du bassin versant ou d'une façon distribuée par unités spatiales.

Les données climatiques sont interprétées à partir des fichiers d'entrée avec le format date-valeur. Cette chronique de valeurs doit couvrir toute la période simulée car cette chronique est discrétisée par MHYDAS-Pesticides afin d'obtenir une résolution temporelle ajustée au pas de temps de la simulation.

#### Note

- Les valeurs climatiques des sous-unités de surface qui appartiennent à la même unité de surface sont toujours identiques.

#### 3.1.1 Pluviométrie

Les valeurs des chroniques de pluviométrie doivent être sous la forme de hauteurs d'eau en millimètres (mm), les chroniques de hauteurs d'eau cumulées sont interpolées linéairement au pas de temps de la simulation puis réparties par pas de temps. Elles sont affichées en sortie en unités métriques (m). Les intensités de pluie doivent être renseignées à une résolution temporelle compatible avec les processus à modéliser. Ainsi, la simulation de la genèse du ruissellement Hortonien requiert des intensités infra-horaires (5 à 10 minutes). Les données directement issues d'un pluviomètre à auget basculeur sont admises.

#### 3.1.2 Évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration potentielle ou de référence ( $ET_0$ ) est requise pour la simulation de l'évapotranspiration à l'échelle des unités de surface ou sous-unités de surface. Comme pour la pluviométrie, la chronique de valeurs de l'évapotranspiration potentielle doit être sous la forme de hauteurs d'eau en millimètres (mm), et celles-ci seront interpolées linéairement au pas de temps de la simulation et affichées en sortie en unités métriques (m). Des valeurs de résolution horaire sont fortement conseillées.

### 3.1.3 Température de l'air

La chronique de valeurs de température doit être fournies en degrés Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ). Les températures sont interpolées linéairement au pas de temps de la simulation et affichées en sortie sous les mêmes unités. La fourniture de valeurs journalières ou horaires est conseillée.

### 3.1.4 Rayonnement global

La chronique de valeurs de rayonnement global doit être exprimée en  $J.cm^{-2}$ . Les valeurs seront interpolées linéairement au pas de temps de la simulation et affichées en sortie en  $MJ.m^{-2}$ . Des valeurs de résolution journalières ou horaires sont conseillées.

## 3.2 Forçages agronomiques

Les modalités d'entretien des parcelles (ou du rang et de l'inter-rang) sont les informations agronomiques à renseigner dans MHYDAS-Pesticides. Deux actions sont prises en compte dans MHYDAS-Pesticides-1.0 : le travail du sol et l'application de pesticides. Ces modalités d'entretien sont indiquées par l'utilisateur sous la forme d'évènements pour chaque parcelle, voire pour les différents rangs et inter-rangs d'une même parcelle, en permettant leur combinaison et ainsi la représentation d'itinéraires techniques différents sur ces entités spatiales. Les détails relatifs à chacune de ces actions sont indiqués ci-dessous.

### 3.2.1 Travail du sol

Il s'agit de spécifier le type d'entretien mécanique de la couche de surface du sol qui est effectué. L'influence de l'entretien mécanique est simulée par la représentation de ses conséquences en matière de modification de la capacité d'infiltration du sol (voir section 4) et de la destruction d'un enherbement associé à la culture principale. 3 types d'outils d'entretien sont actuellement considérés dans le modèle :

- Rotavator
- Outil à dent
- Charrue

Ces outils modifient différemment la structure du sol et par conséquent l'évolution de l'état de la surface et de la capacité d'infiltration seront aussi différentes (situation discutée plus en détail dans la section 4.2). Donc, pour un évènement de travail du sol il faut indiquer la date de labour, la sous-unité de surface concernée et le type d'outil.

#### Notes

- Les évènements de travail du sol sont considérés être instantanés.
- L'action de l'outil d'entretien du sol est supposée affecter l'ensemble de la première strate de sol. L'utilisateur peut paramétrer le nombre et l'épaisseur des strates de sol, et l'horizon pédologique associé à chaque strate. Il est donc fortement conseillé de définir une première strate présentant l'épaisseur correspondant à la profondeur de travail de l'outil utilisé.

### 3.2.2 Application de pesticides

Pour l'application d'une molécule ou *pop* (polluant organique persistant), l'utilisateur fixe :



- la date de l’application,
- le nom de la substance active appliquée,
- la masse par unité de surface de la substance active appliquée,
- la sous-unité de surface sur laquelle l’application a lieu,
- l’efficacité d’application liée au processus de dérive<sup>4</sup>,
- le type de pulvérisateur ou équipement utilisé (facultatif, voir section 6.1),
- la qualité de réglage de l’équipement (facultatif, voir section 6.1),
- le coefficient d’extinction dans la loi de Beer-Lambert, utilisée pour représenter lors de l’application la distribution de la masse de substance active (hors dérive) entre le couvert de la culture et le sol (voir section 6.1),

Ces informations sont utilisées par MHYDAS-Pesticides pour estimer la quantité réellement appliquée (à la fois sur les feuilles de la culture et sur le sol) selon l’équation 1.

$$m_a = R_a A_{SubSU} \eta_a \quad (1)$$

avec :

$m_a$  : masse effective de *pop* appliqué sur la sous-unité spatiale de surface (*kg*),

$R_a$  : la masse par unité de surface de *pop* appliquée sur la sous-unité spatiale de surface (*kg m<sup>-2</sup>*),

$A_{SubSU}$  : aire de la sous-unité spatiale de surface (*m<sup>2</sup>*),

$\eta_a$  : efficacité de l’application de *pop* sur la sous-unité spatiale de surface ( $0 \leq \eta_a \leq 1$ ).

On notera que le calcul de la répartition finale entre couvert végétal et sol à l’échelle parcellaire est détaillé dans la section 6.1. Le calcul prend en compte la surface foliaire de la culture et la qualité de réglage de l’équipement d’épandage (si connu).

#### Notes

- Les applications de pesticides sont considérées être instantanées.
- Les simulations sont strictement mono-molécules. Il est donc nécessaire de lancer plusieurs simulations dans le cas d’une étude multi-molécules. La possibilité de prendre en compte une application avant la date de début de la simulation n’est pas non plus disponible sauf à évaluer les concentrations initiales en matière active dans le sol et le couvert, consécutives à cette application antérieure.

### 3.3 Forçages biologiques

Les forçages biologiques dans MHYDAS-Pesticides font référence aux processus d’évolution de la surface foliaire de la culture. En effet ce processus n’est pas représenté par le modèle car il nécessiterait de coupler un modèle de culture. La valeur de l’indice foliaire de la culture  $LAI_c$  et son évolution au cours de la simulation sont donc considérés comme des données d’entrée du modèle.

<sup>4</sup> La dérive correspond à la part de substance active qui lors de l’application n’atteint pas le couvert ou le sol de la parcelle d’épandage du fait des processus de transport aériens.

Si le type de culture simulé sur l'unité de surface est la vigne, les valeurs sont estimées par interpolation polynomiale des mesures effectuées sur un vignoble conduit en gobelet non palissé sous un contexte méditerranéen (Louchart et al. 2012 ; Pare 2011). La valeur maximale de  $LAI_c$  ou  $LAI_{c_{max}}$  pour ce type de culture est  $1.999 m^2 m^{-2}$  pour le jour julien 199 (18 juillet ou 17 juillet pour année bissextile). Cependant, si le type de culture simulé est différent, l'utilisateur peut renseigner pour chaque unité de surface un  $LAI_c$  qui sera supposé constant pendant toute la période simulée. Dans tous les cas il est supposé que la valeur de  $LAI_c$  est uniforme sur toute l'unité de surface ou parcelle. Des variations potentielles liées à des modes de gestion différenciés selon les rangs de culture pour les cultures en rang ne sont pas considérés.

#### Note

- Pour le cas de cultures en rangs avec une couverture limitée du sol, la possibilité d'une croissance significative d'adventices est considérée. Elle est incluse dans les processus simulés et ne fait donc pas partie des fonctions de forçage. Contrairement à l'indice foliaire de la culture défini à l'échelle de la parcelle agricole, l'indice des adventices est supposé varier selon les modes de gestion spécifiques des rangs et inter-rangs. L'indice de surface foliaire total par sous-unité de surface est calculé par la somme de l'indice de la culture sur l'ensemble de l'unité et celui des adventices sur la sous-unité .

### 3.4 Conditions initiales

MHYDAS-Pesticides est un modèle qui simule sur un ensemble d'instantanés compris entre une date initiale et une date finale l'état du système représenté. Certains processus sont représentés par des approches itératives qui estiment, à partir des valeurs actuelles, l'évolution de variables du système d'un instant à l'autre (équations de transfert, cinétique de dégradation, équilibres,...). Ces approches ont besoin de connaître l'état initial du système pour amorcer les itérations. Ces conditions initiales sont passées au modèle pour chaque objet comme attributs spatiaux.

#### 3.4.1 d'ordre hydrologique

L'utilisateur doit fournir au modèle des conditions initiales pour les variables hydriques suivantes :

- sol sous les parcelles : teneur en eau ou potentiel de pression pour chaque horizon de chaque parcelle,
- flaquage à la surface des parcelles : hauteur d'eau de chaque parcelle (nulle par défaut, sinon la même hauteur d'eau est initialisée sur chaque sous-unité de surface),
- sol sous le réseau hydrographique : teneurs en eau des réservoirs superficiel et profond (voir section 5.5.2 pour plus de précision) (capacité au champ par défaut).

#### 3.4.2 d'ordre biogéochimique (solutés)

L'utilisateur doit fournir au modèle des conditions initiales pour les variables biogéochimiques suivantes :

- sol sous les parcelles : concentration ou teneur en pesticides pour chaque horizon de chaque parcelle,
- flaquage à la surface des parcelles : concentration en pesticides dans l'eau de flaquage,
- sol et litière du réseau hydrographique : teneur en pesticides des matériaux sorbants (nulle par défaut).

### 3.4.3 autres conditions à la limite

L'utilisateur doit fournir au modèle des conditions pour initialiser les états de surface :

- le cumul d'énergie cinétique de la pluie de chaque parcelle depuis le dernier travail du sol.

## 4 Représentation de l'évolution de l'état de surface du sol et de sa capacité d'infiltration

L'état de surface du sol (*SSC* pour soil surface condition) détermine les propriétés d'infiltration du sol et a donc un impact prononcé sur la simulation du partage infiltration-ruissellement des flux d'eau et de solutés (cf Moussa et al., 2002). En milieu cultivé, l'état de surface évolue en fonction des actions de gestion du sol et du développement de la végétation. Une originalité de MHYDAS-Pesticides-1.0 par rapport à la plupart des modèles de transfert de pesticides à l'échelle du bassin versant est de représenter l'évolution des états de surface et d'en déduire l'évolution de la conductivité hydraulique de surface du sol ( $K_s$ ), paramètre essentiel dans la modélisation des flux hydrologiques. Dans la suite nous présentons la gamme des états de surface du sol considérés, les principes de modélisation de leur évolution et, enfin, le mode d'estimation de la conductivité hydraulique à partir de la connaissance de l'état de surface.

### Notes

- En raison de la possibilité d'avoir des forçages agronomiques multiples variant spatialement au sein de la parcelle agronomique, les processus décrits dans cette section sont simulés au niveau de chaque sous-unité de surface (rangs et inter-rangs), supposée être soumise de manière uniforme aux différents forçages.
- La surface du sol fait référence à la strate supérieure du sol distinguée dans la modélisation.

### 4.1 Typologie des états de surface du sol

Les différents états de surface représentés dans MHYDAS-Pesticides-1.0, s'inscrivent dans les états de surface décrits initialement par Andrieux et al. (2001) pour les parcelles viticoles méditerranéennes (voir figure 5). Cette typologie des états de surface a été validée ensuite sur un ensemble de descriptions et de mesures d'infiltrations menées pendant plusieurs années sur une grande diversité de sols méditerranéens sous cultures annuelles et permanentes, viticoles et parcours. Elle met en avant l'influence prépondérante de plusieurs processus (Andrieux et al. 2021) :

- le travail du sol créateur de porosité dans la couche de surface du sol,
- la fermeture naturelle d'une couche de sol travaillée sous l'effet des alternances dessiccation-humectation,
- les processus de battance et de sédimentation liée à l'énergie cinétique de la pluie qui entraînent la formation d'encroûtement de surface limitant l'infiltrabilité du sol,
- le développement du couvert végétal et de son enracinement qui favorisent également la création de porosité dans la couche de surface et par conséquent l'infiltrabilité du sol si celle-ci était initialement limitante,
- la texture du sol et notamment la présence d'une charge caillouteuse qui préserve en partie le sol des effets de battance et maintient en général une infiltrabilité suffisante.

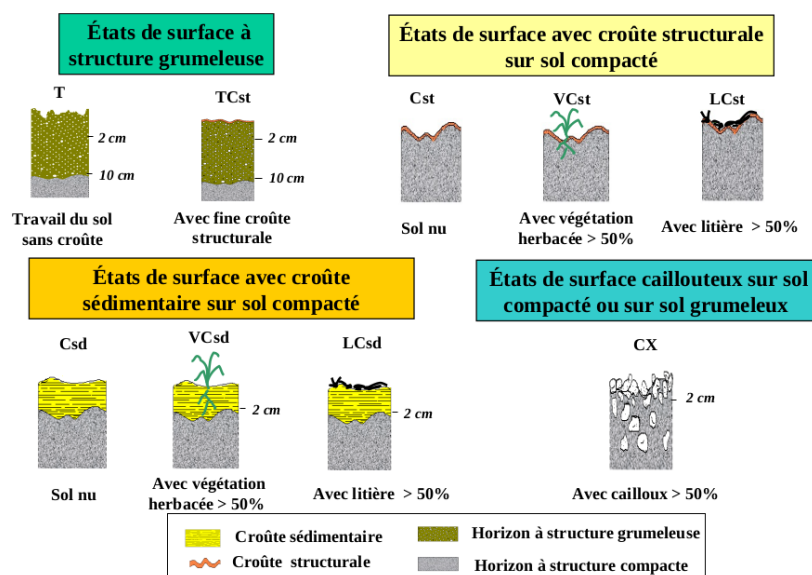


FIGURE 5 – Typologie des états de surface du sol (Andrieux et al. 2001).

Les états de surface considérés dans MHYDAS-Pesticides sont  $T$ ,  $TCst$ ,  $Cst$ ,  $VCst$  et  $Cx$ . Ils se différencient selon les critères suivants :

- une structure du sol grumeleuse suite à un travail du sol récent ( $T$  et  $TCst$ ) qui maximise la capacité d’infiltration du sol,
- la présence d’une croûte structurale occupant une proportion significative de la surface du sol ( $Cst$  et  $VCst$ ) et diminuant la capacité d’infiltration,
- une charge en cailloux importante ( $Cx$ ) qui favorise la capacité d’infiltration,
- un développement significatif de la végétation herbacée ( $VCst$ ) qui favorise la capacité d’infiltration.

On notera que les états de surface  $LCst$  et  $LCsd$ , qui mettent l’accent sur la présence de litière, ne sont pas considérés car les processus de formation de litière ne sont pas représentés par cette version de MHYDAS-Pesticides. Les états de surface  $Csd$ ,  $VCsd$ ,  $LCsd$  marqués par la présence de croûtes sédimentaires très peu perméables ne sont pas non plus représentés à ce stade du fait de la rareté de leur occurrence en situation méditerranéenne cultivée (Andrieux et al. 2021).

Pour estimer l’occurrence d’un état de surface à un temps donné  $t$  sur une unité ou une sous-unité spatiale donnée, MHYDAS-Pesticides simule deux mécanismes.

- i) Le premier est l’évolution de la structure d’un état de surface du sol consécutif à un travail du sol qui fait passer l’état de surface du sol successivement du stade  $T$  aux stades  $TCst$  et  $Cst$ . Ces stades correspondent aux stades d’évolution successifs classiquement observés après travail du sol. Le cas de l’état de surface  $Cx$ , correspondant au sol caillouteux, différencié en tant que tel dans la typologie décrite par Andrieux et al. (2001), est considéré implicitement en tenant compte de l’influence de la

charge caillouteuse du sol sur l'intensité et la vitesse d'évolution des 3 stades postérieurs au travail du sol.

- ii) Le second est le développement d'une végétation adventice qui introduit une variation du 3 ème état de surface après travail du sol, à savoir l'état de surface  $Vcst$ .

Les deux sections suivantes détaillent les principes de modélisation retenus pour ces deux processus.

## 4.2 Représentation de l'évolution des états de surface suite à un travail du sol

MHYDAS-Pesticides reprend le formalisme empirique développé et calibré par Paré et al. (2011) sur un ensemble d'observations temporelles d'états de surface pour simuler l'évolution des états de surface après travail du sol. Le modèle de Paré et al. (2011) consiste en une régression logistique qui prédit la probabilité d'occurrence des états de surface  $T$ ,  $Tcst$  et  $Cst$  en fonction

- du cumul d'énergie cinétique des pluies intervenues depuis le travail du sol,
- de la rugosité du sol induite par l'outil de travail du sol et
- de la charge en cailloux selon les équations 2 suivantes :

$$\begin{aligned}
 Prob(SSC_{Cst}) &= \frac{\exp(C_2)}{1+\exp(C_2)} \\
 Prob(SSC_{TCst}) &= \frac{\exp(C_1)}{1+\exp(C_1)} - Prob(SSC_{Cst}) \\
 Prob(SSC_T) &= 1 - Prob(SSC_{TCst})
 \end{aligned} \tag{2}$$

avec  $C_1$  et  $C_2$  des coefficients calculés selon les équations 3 suivantes prenant en compte comme variables prédictrices la classe de teneur en cailloux de la couche de surface du sol, la classe de rugosité initiale du sol après travail du sol et le cumul d'énergie cinétique depuis travail du sol :

$$\begin{aligned}
 C_1 &= k1 + k1_{ston}(C_{ston}) + k1_{rough}(C_{rough}) + k_{E_k} \left( \sum_{last\ tillage} (E_k * RR) \right)^{1/2} \\
 C_2 &= k2 + k2_{ston}(C_{ston}) + k2_{rough}(C_{rough}) + k_{E_k} \left( \sum_{last\ tillage} (E_k * RR) \right)^{1/2}
 \end{aligned} \tag{3}$$

avec  $E_k$  l'énergie cinétique de la pluie ( $J\ m^{-2}\ mm^{-1}$ ),  $C_{ston}$  la classe de pierrosité du sol,  $C_{rough}$  la classe de rugosité du sol,  $RR$  la hauteur de pluie cumulée depuis travail du sol ( $mm$ ) et  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $k1_{ston}$ ,  $k2_{ston}$ ,  $k1_{rough}$ ,  $k2_{rough}$ ,  $k_{E_k}$ , les coefficients des modèles de régression des équations 3 dont les valeurs sont données en Annexe B.

Les classes de pierrosité  $C_{ston}$  et de rugosité du sol  $C_{rough}$  sont différenciées selon les intervalles donnés dans les tableaux 1 et 2.

L'énergie cinétique de la pluie ( $E_k$ ) est calculée en fonction de l'intensité de pluie selon l'équation de Zanchi-Torri (Zanchi et Torri 1980, cités par Pare 2011) :

TABLE 1 – Classes de rugosités selon l’outil de travail du sol.

Outil de travail du sol	Rugosité (cm)	Classe de rugosité du sol
Rotavator	<2	1
Outil à dent	2-5	2
Charrue	>5	3

TABLE 2 – Classes de piérosité du sol selon pourcentage de cailloux à la surface du sol.

% de piérosité du sol	Classe de rugosité du sol
0 à 25%	1
25 à 50%	2
50 à 100%	3

$$E_k = 9.81 + 11.25 * \log_{10}(I_{RR}) \quad (4)$$

avec  $I_{RR}$  l’intensité de pluie ( $mm h^{-1}$ ) calculée ici sur un pas de temps de 5 mn.

Les équations 2 et 3 permettent de déterminer les seuils d’énergie cinétique cumulée depuis le dernier travail du sol (seuils  $A$  et  $B$ ), à partir desquels un changement du  $SSC$  majoritaire se produit pour une combinaison d’outil de travail du sol et de piérosité. Un exemple est donné en figure 6. Les valeurs exactes des seuils de transition entre  $SSC$  sont indiquées en Annexe B pour toutes les combinaisons de classes de piérosité  $C_{ston}$  et de rugosité  $C_{rough}$ .

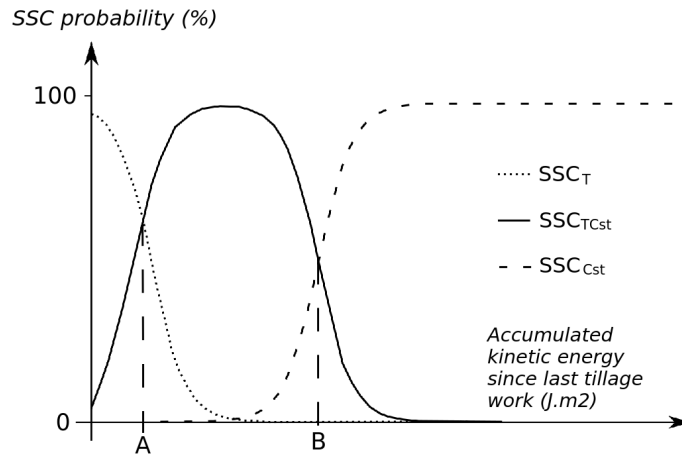


FIGURE 6 – Évolution des états de surface du sol en fonction de l’énergie cinétique de la pluie cumulée depuis le dernier travail du sol.

#### Note

- Les valeurs des coefficients du modèle de régression logistique ont été estimées en utilisant des données d'énergie cinétique de pluie calculées par l'équation de Zanchi-Torri avec des intensités de pluie observées au pas de temps de 5 minutes. De ce fait et en raison de la forte dépendance de l'intensité de pluie au pas de temps considéré pour son estimation, il est fortement conseillé d'utiliser un pas de temps proche de 5 mn pour les simulations avec MHYDAS-Pesticides.

### 4.3 Représentation de l'évolution de la couverture du sol par les adventices

Une des composantes significatives des états de surface d'une culture, surtout dans le cas de cultures ne couvrant que partiellement le sol, est l'état de développement des adventices. MHYDAS-Pesticides-1.0 inclut donc une modélisation de ce développement qui considère deux processus successifs, à savoir l'émergence et la croissance après émergence des adventices selon les principes développés par Pare (2011) dans le cadre de parcelles viticoles méditerranéennes. Dans ce dernier contexte, le développement de la végétation spontanée est un processus saisonnier en lien avec les pratiques d'entretien du sol.

- A la fin de l'été et pendant l'automne (généralement après début septembre), les adventices vont germer et croître avec le premier évènement pluvieux significatif et constituer un enherbement hivernal permis par les conditions hydriques favorables.
- A partir de début février (après le 1 février) et pendant le printemps, de nouvelles germinations démarrent dès destruction du couvert herbacé hivernal par travail du sol ou par application de traitements herbicides (section 3.2). La fin de la saison de germination printanière est marquée par la première vague de chaleur (estimée dépasser deux jours consécutifs avec une température supérieure à 25°C) après le 1 juin.

La gamme d'espèces herbacées impliquées dans le développement des adventices à l'automne et au printemps diffère même si certaines espèces peuvent être présentes aux deux saisons.

#### 4.3.1 Germination et émergence des adventices

Le processus d'émergence est provoqué par trois processus majeurs : levée de dormance des graines, germination et croissance des jeunes organes avant émergence. Par souci de simplicité dans la modélisation, Pare (2011) a proposé de modéliser l'émergence principalement par la représentation du processus de germination. La levée de dormance n'est pas représentée en tant que telle, mais elle est définie empiriquement en fonction des périodes où elle est généralement observée. Pour la saison automnale, la levée de dormance est considérée avoir lieu en fin d'été au premier évènement pluvieux dépassant 30 mm en 36h. Pour la saison printanière, la levée est supposée intervenir dès le 1er février sans dépendance à un évènement climatique spécifique. L'émergence des graines germées n'est pas non plus représentée. Il est supposé que toute plante germée émerge : ainsi, la densité de plantes émergées est prise égale à la densité de graines germées. Les écarts possibles à ces hypothèses simplificatrices ne sont pas considérés problématiques car elles ne sont pas supposées introduire d'incertitude forte sur l'estimation finale de l'évolution de la couverture du sol par les adventices.

MHYDAS-Pesticides-1.0 représente le processus de germination selon le concept de temps hydrothermal

ou  $\theta_{HT_d}$  (équation 5), qui combine le temps thermique dérivé d'une température de base ou  $T_{germ_{min}}$  et le temps hydrique dérivé d'un potentiel hydrique de base ou  $\Psi_{min}$  (Gummerson 1986, cité par Pare 2011).

$$\theta_{HT_d} = \sum [(\Psi_d - \Psi_{min})(T_d - T_{germ_{min}})] \quad (5)$$

avec :

$\theta_{HT_d}$  : temps hydrothermal journalier pour la germination de l'espèce herbacée ( $MPa \text{ } ^\circ K$ ).

$T_d$  : température journalière ( $^\circ K$ ).

$T_{germ_{min}}$  : température de base ou minimale pour la germination de l'espèce herbacée ( $^\circ K$ ).

$\Psi_d$  : potentiel hydrique du sol moyen journalier ( $MPa$ ).

$\Psi_{min}$  : potentiel hydrique minimal du sol pour la germination de l'espèce herbacée ( $MPa$ ).

Le taux de germination journalier ( $g_d$ ) est ensuite calculé avec une fonction probit<sup>5</sup> qui décrit la proportion journalière (de 0 à 1) des graines germées à partir du début de la germination des adventices (équation 6).

$$probit(g_d) = \frac{\left( \frac{\sum \Psi_d - \Psi_{min}}{n_{sd}} - \frac{\sum T_d - T_{germ_{min}}}{\theta_{HT_d}} \right)}{\sigma(\Psi_{min})} \quad (6)$$

avec :

$g_d$  : taux de germination journalier de l'espèce herbacée ( $0 \leq g_d \leq 1$ ).

$n_{sd}$  : nombre de jours à partir du début de la germination de l'espèce herbacée (i.e. le nombre de jours lorsque  $\Psi_d \geq \Psi_{min}$  et  $T_d > T_{germ_{min}}$ ).

$\sigma(\Psi_{min})$  : écart type de  $\Psi_{min}$ .

Les valeurs de  $\Psi_d$  sont calculées avec une moyenne mobile journalière des valeurs de potentiel hydrique de la strate supérieure du sol au pas de temps de la simulation (voir section 5.2.1). Les valeurs de  $T_d$  sont aussi calculées avec une moyenne mobile journalière des valeurs de température produites au pas de temps de la simulation (voir section 3.1.3).

#### Note

- MHYDAS-Pesticides indexe un jour de simulation toutes les 24 heures à partir du début de la simulation. Il est donc conseillé de choisir l'heure de début des simulations en fonction de la définition souhaitée du jour de simulation.

La simulation de la germination est effectuée pour l'ensemble des espèces présentes sur une parcelle ou un rang ou inter-rang.

Ainsi, pour la simulation de la germination en contexte viticole, l'utilisateur doit renseigner :

- le nom de la base de données de l'occurrence des espèces herbacées (Annexe A),
- le nom ou les noms des espèces herbacées selon la base de données,
- la saison de germination de chaque espèce herbacée (printemps, automne ou toujours),
- le temps hydrothermal journalier pour la germination de chaque espèce herbacée ( $\theta_{HT_d}$ ),

5. Fonction statistique inverse de la fonction de distribution cumulative normale (Pare 2011).



- la succion minimale pour la germination de l'espèce herbacée ( $\Psi_{min}$ ),
- la température minimale pour la germination de l'espèce herbacée ( $T_{germ_{min}}$ ),
- l'écart type de la succion minimale de l'espèce herbacée ( $\sigma(\Psi_{min})$ ),
- la nature du sol des unités de surface,
- l'état initial des sous-unités de surface,
- le potentiel hydrique initial des sous-unités de surface,
- la stratégie d'entretien du sol de chaque sous-unité de surface (travail du sol, désherbage chimique ou mixte).

#### Note

- Dans le cadre de MHYDAS-Pesticides-1.0 une base de données a été constituée pour estimer les paramètres du modèle de germination pour les espèces principales observées en parcelles viticoles et ayant fait l'objet d'études de la littérature. Les principales espèces concernées ainsi que leur occurrence en fonction de la saison de germination (automne ou printemps), de la stratégie d'entretien du sol (mécanique, chimique ou mixte) et de la nature du sol (acide, hydromorphe ou autre) sont indiquées en Annexe A.

### 4.3.2 Croissance des adventices

La modélisation de la croissance se base sur des concepts proches de ceux utilisés pour le modèle de germination, c'est à dire en fonction du temps pondéré par les conditions environnementales subies par la plante. Dans le cas de la croissance, le temps est représenté par les sommes de températures et le cumul de rayonnement (voir Pare (2011)). On notera que la croissance ne tient donc pas compte ici de la contrainte hydrique subie par la plante.

Le poids sec ( $w_d$ ) au jour  $d$ , qui est un indicateur de la croissance en masse de chaque plante d'une espèce herbacée, est calculé selon l'équation suivante (Lalauze et al. 2012).

$$w_d = w_0 \exp \left( RGR \sum_0^{d-1} EDD \right) \quad (7)$$

avec :

$w_d$  : poids sec journalier de l'espèce herbacée ( $g$ ),

$w_0$  : poids sec initial de l'espèce herbacée ( $g$ ),

$RGR$  : taux de croissance relatif par jour de l'espèce herbacée ( $EDD^{-1}$ ),

$EDD$  : degrés-jours effectifs pour l'espèce herbacée ( $EDD$ ),

$d$  : indice du jour de simulation.

Le concept de  $EDD$  (Scaife et al. 1987 et Aikman et Scaife 1993, cités par Pare 2011) est un analogue du temps hydrothermal et prend en compte la lumière et la température comme les éléments responsables du processus de croissance (équation 8).

Si  $T_d \geq T_{grow_{min}}$  :

$$EDD = (T_d - T_{grow_{min}}) + (Rg_d S_z F_z) \begin{cases} S_z = A_{cst} (w_d)^{2/3} \\ F_z = 1 - \exp\left(-k_{grow} \frac{S_l}{S_z}\right) \\ S_l = LAR w_d \end{cases} \quad (8)$$

avec :

$T_{grow_{min}}$  : température de base ou minimale pour la croissance de l'espèce herbacée ( $^{\circ}C$ ),

$Rg_d$  : rayonnement global journalier ( $MJ m^{-2}$ ),

$S_z$  : aire de la couronne foliaire d'une plante de l'espèce herbacée ( $m^2$ ),

$F_z$  : coefficient de lumière interceptée par le feuillage de l'espèce herbacée dans  $S_z$ ,

$A_{cst}$  : constante allométrique de l'espèce herbacée ( $m^2 g^{-2/3}$ ),

$k_{grow}$  : coefficient d'extinction pour la croissance de l'espèce herbacée,

$S_l$  : aire foliaire de l'espèce herbacée ( $m^2$ ),

$LAR$  : surface foliaire par unité de masse de l'espèce herbacée ( $m^2 g^{-1}$ ).

Les valeurs de  $Rg_d$  sont calculées par cumul pendant la journée des valeurs de rayonnement produites au pas de temps de la simulation (voir section 3.1.4).

L'étape suivante calcule successivement

- i) la proportion de couverture du sol de chaque espèce d'adventices en intégrant l'ensemble des plantes germées de chaque espèce (équation 9),
- ii) la proportion de couverture du sol de toutes les adventices à l'échelle de chaque sous-unité parcellaire par cumul des proportions par espèces (équation 10).

On notera que dans les équations 9 et 10 on limite bien évidemment la couverture maximale d'une espèce ou de l'ensemble des espèces à 1. En effet, comme les calculs ne prennent pas en compte les processus de compétition intra et inter-spécifique, il est possible que les proportions calculées de couverture dépassent 1.

$$SC_i = \min(1 ; S_z^i g_d^i \rho_a^i) \quad (9)$$

$$SC_{total} = \min(1 ; \sum_{i=0}^{i=n_e} SC_i) \quad (10)$$

avec :

$SC$  : indice de couverture du sol par une espèce herbacée ( $m^2 m^{-2}$ ),

$\rho_a$  : densité potentielle de graines de l'espèce herbacée  $i$  au début de la saison de germination ( $m^{-2}$ ),

$SC_{total}$  : indice de couverture du sol par l'ensemble des espèces herbacées de la sous-unité de surface ( $m^2 m^{-2}$ ),

$n_e$  : le nombre d'espèces adventices simulées

Finalement le  $LAI_w$  de toutes les espèces herbacées d'une sous-unité de surface est déterminé par la somme des surfaces foliaires des plantes germées de toutes les espèces pondérées par la densité de graines de chaque espèce sur la sous-unité :

$$LAI_w = \min(LAI_{wmax} ; \sum_{i=0}^{i=n_e} (S_i^i g_d^i \rho_a^i)) \quad (11)$$

avec  $LAI_w$  : indice de surface foliaire de toutes les adventices ( $m^2 m^{-2}$ ),  $LAI_{wmax}$  indice maximum autorisé pour la surface foliaire de toutes les adventices

Ici également, pour éviter une surestimation du  $LAI_w$  du fait de l'absence de simulation de compétition entre plantes, la valeur de cette variable est limitée par un seuil  $LAI_{wmax}$  défini par l'utilisateur.

#### Note

- Les valeurs des indices de couverture du sol par les adventices et les valeurs des indices de surface foliaire des adventices ne sont pas réinitialisées à la fin de chaque saison de germination.

### 4.3.3 Effet des actions d'entretien du sol sur le couvert herbacé

Selon les observations in situ et interprétations réalisées par Pare (2011) sur systèmes viticoles méditerranéens l'effet des événements de travail du sol (section 3.2.1) et d'application des pesticides (section 3.2.2) sont représentés selon les principes suivants

- Les effets représentés ne concernent que l'émergence et la croissance et pas la germination dont le potentiel est supposé constant quelle que soit l'action d'entretien du sol et ne dépendre que des conditions environnementales et des saisons.
- Si un événement de travail de sol est effectué, le couvert d'adventice est considéré comme détruit et les valeurs de  $SC$ ,  $SC_{total}$  et  $LAI_w$  sont mises à zéro à la date de l'évènement. Le processus d'émergence n'est pas affecté.
- Si une application d'herbicide de post-levée est effectuée, la croissance des adventices ainsi que l'émergence de nouvelles graines sont supposées à l'arrêt pendant 25 jours, délai au bout duquel l'effet destructeur du traitement herbicide est considéré effectif. Donc durant les 25 premiers jours après traitements les valeurs de  $SC$ ,  $SC_{total}$  et  $LAI_w$  sont maintenues constantes. Au bout des 25 jours ces valeurs sont mises à zéro et l'ensemble des processus d'émergence et de croissance reprennent.
- Si une application d'herbicide de pré-levée associée à un herbicide de post-levée est effectuée, l'émergence et la croissance des adventices sont également arrêtées pendant 25 jours. Après cette période les valeurs de  $SC$ ,  $SC_{total}$  et  $LAI_w$  sont mises à zéro comme dans le cas précédent. Mais pour prendre en compte l'effet inhibiteur de l'herbicide de pré-levée, aucune nouvelle émergence (et donc aucun nouveau développement d'adventice) ne peut intervenir avant 120 jours après traitement.

En résumé, pour simuler la croissance des adventices l'utilisateur doit renseigner :

- le nom ou les noms des espèces herbacées selon la base de données,
- la constante allométrique de l'espèce herbacée ( $A_{cst}$ ),
- le poids sec initial de l'espèce herbacée ( $w_0$ ),
- le coefficient d'extinction pour la croissance de l'espèce herbacée ( $k_{grow}$ ),
- le rapport de surface foliaire de l'espèce herbacée ( $LAR$ ),

- le taux de croissance relatif par jour de l'espèce herbacée ( $RGR$ ),
- la densité potentielle de graines de l'espèce herbacée au début de la saison de germination ( $\rho_a$ ),
- la température de base ou minimale pour la croissance de l'espèce herbacée ( $T_{grow_{min}}$ ),
- le seuil de calcul de  $LAI_w$ ,
- les forçages agronomiques (par défaut aucune action d'entretien du sol n'est considérée).

#### Note

- MHYDAS-Pesticides ne simule pour l'instant dans sa version 1.0 que les processus de germination et de croissance d'adventices pour des cultures en rang ou à faible couverture. Si le type de culture ne correspond pas, la simulation de ces processus doit être inactivée.

## 4.4 Estimation de la conductivité hydraulique à saturation de la surface du sol à partir des états de surface du sol

La variabilité des états de surface du sol induit une variabilité significative de la conductivité hydraulique à saturation. La figure 7 montre la correspondance entre les deux variables dans le cas des sols méditerranéens (Andrieux et al. 2021).

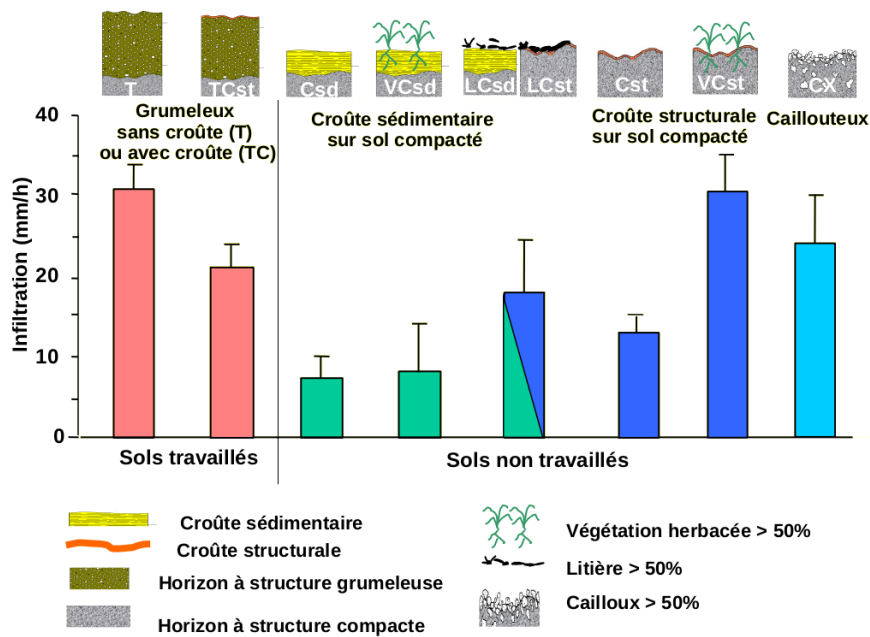


FIGURE 7 – Relation entre la conductivité hydraulique à saturation et les états de surface du sol en zone viticole méditerranéenne (Andrieux et al. 2001).

MHYDAS-Pesticides estime la conductivité hydraulique à saturation,  $K_s$ , de la couche de surface du sol en supposant que la valeur de  $K_s$  varie entre des valeurs maximale  $K_{s,max}$  et minimale  $K_{s,min}$  en fonction de la probabilité majoritaire d'état de surface du sol et de l'extension de couverture du sol par les adventices, telles que prédites par les approches détaillées dans les deux sections précédentes.

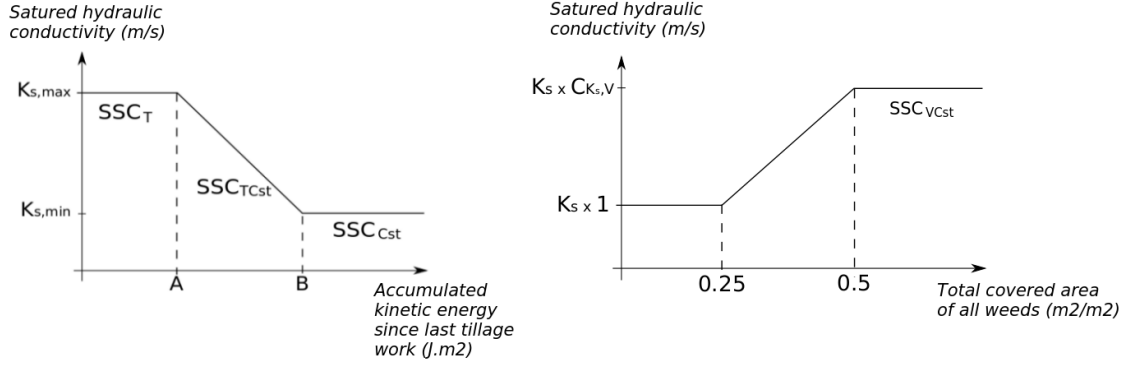


FIGURE 8 – Évolution modélisée de la conductivité hydraulique à saturation selon le cumul d'énergie cinétique de la pluie et selon le développement de la couverture du sol par les adventices.

La figure 8 schématise les principes de l'estimation qui suit deux étapes.

La première étape détermine la conductivité hydraulique potentielle du sol hors influence de l'enherbement. Cette étape se fonde sur la connaissance du cumul d'énergie cinétique depuis le dernier travail du sol réalisé sur l'unité ou la sous-unité de surface en distinguant trois cas :

- si l'état de surface  $T$  est le plus probable,  $K_s$  atteint sa valeur maximale  $K_{s,max}$ ,
- si l'état de surface  $Cst$  est le plus probable,  $K_s$  atteint sa valeur minimale  $K_{s,min}$ ,
- si l'état de surface  $TCst$ , qui constitue une transition entre les deux états de surface précédents, est le plus probable,  $K_s$  diminue linéairement en fonction de l'énergie cinétique cumulée.

En prenant en compte les seuils A et B des cumuls d'énergie cinétique tels qu'estimés en section 4.2 on a donc une estimation provisoire du  $K_s$ , notée  $K_s^{prov}$  :

$$\begin{aligned}
 \text{Si } \left[ \sum_{last\ tillage} (E_k * RR) \right] \leq A & \quad \text{alors } K_s^{prov} = K_{s,max} \\
 \text{Si } A < \left[ \sum_{last\ tillage} (E_k * RR) \right] < B & \quad \text{alors } K_s^{prov} = K_{s,max} - \left[ \frac{[K_{s,max} - K_{s,min}][(\sum E_k * RR) - A]}{B - A} \right] \\
 \text{Si } \left[ \sum_{last\ tillage} (E_k * RR) \right] \geq B & \quad \text{alors } K_s^{prov} = K_{s,min}
 \end{aligned} \quad (12)$$

avec :

$K_{s,max}$  : conductivité hydraulique à saturation maximale de la surface du sol ( $m\ s^{-1}$ ).

$K_{s,min}$  : conductivité hydraulique à saturation minimale de la surface du sol ( $m\ s^{-1}$ ).

La seconde étape de calcul module la conductivité du sol en fonction de la couverture du sol par les adventices selon les règles suivantes

- si la couverture du sol par les adventices est inférieure à 25% il est supposé qu'il n'y a pas d'incidence sur  $K_s$ ,
- si la couverture du sol dépasse le seuil de 50% l'état de surface est  $VCst$  et l'effet d'amélioration de la conductivité est considéré maximal :  $K_s$  est multiplié par un coefficient supérieur à 1 défini par l'utilisateur avec toutefois une limite d'augmentation fixée à la valeur de  $K_{s,max}$ ,
- si la couverture du sol se situe entre 25% et 50% une augmentation linéaire en fonction de la valeur

du pourcentage de couverture est supposée entre la valeur de conductivité de l'état de surface hors enherbement et sa valeur maximale en situation d'enherbement généralisé.

Selon ces règles on peut calculer la valeur finale du  $K_s$  ainsi

$$\begin{aligned}
 \text{Si } SC_{total} \leq 0.25 & \quad \text{alors } K_s = K_s^{prov} \\
 \text{Si } 0.25 < SC_{total} < 0.5 & \quad \text{alors } K_s = K_s^{prov} + \left[ K_s (C_{K_s,V} - 1) \left( \frac{SC_{total} - 0.25}{0.5 - 0.25} \right) \right] \\
 \text{Si } SC_{total} \geq 0.5 & \quad \text{alors } K_s = \min(C_{K_s,V} * K_s^{prov} ; K_{s,max})
 \end{aligned} \tag{13}$$

avec  $C_{K_s,V}$  un coefficient multiplicatif de la conductivité hydraulique à saturation pour un sol à forte couverture herbacée.

#### Note

- L'impact de l'évolution des états de surface n'est simulé dans cette version MHYDAS-Pesticides-1.0 que pour la conductivité hydraulique de la couche de surface du sol. Il n'est pas encore représenté vis à vis des autres propriétés de la couche de surface du sol (e.g; masse volumique, porosité, relation h( heta), coefficient de Manning...).

En résumé, les données à renseigner par l'utilisateur pour la représentation de l'évolution des états de surface et de la conductivité hydraulique de la couche de surface du sol à l'échelle des unités et sous-unités de surface sont :

- la classe de pierrosité des unités de surface,
- les conductivités hydrauliques à saturation maximales et minimales du type de sol de l'unité,
- l'énergie cinétique cumulée initiale depuis le dernier travail du sol par sous-unité (celle-ci initialise la conductivité hydraulique à saturation selon les seuils  $A$  et  $B$ ),
- l'état de surface initial de chaque sous-unité (cf figure 2),
- les forçages agronomiques de travail du sol (par défaut aucun évènement d'entretien du sol n'est considéré),
- la période pour prendre en compte les forçages agronomiques précédents à la date de début de simulation (optionnel).

## 5 Représentation des processus hydrologiques

Les flux principaux dans MHYDAS-Pesticides sont affichés dans la figure 6. Ces flux suivent une représentation spatiale basée sur les discontinuités hydrologiques (section 2). Les mécanismes de production et de transfert de flux sont expliqués dans les sous-sections ci-dessous.

1. précipitations,
2. transpiration,
3. évaporation,
4. ruissellement venant de l'unité amont,

5. ruissellement partant vers l'unité aval,
6. infiltration de la SubSU vers la GU,
7. drainage,
8. infiltration de la RS vers la GRS,
9. ruissellement partant vers l'unité aval.

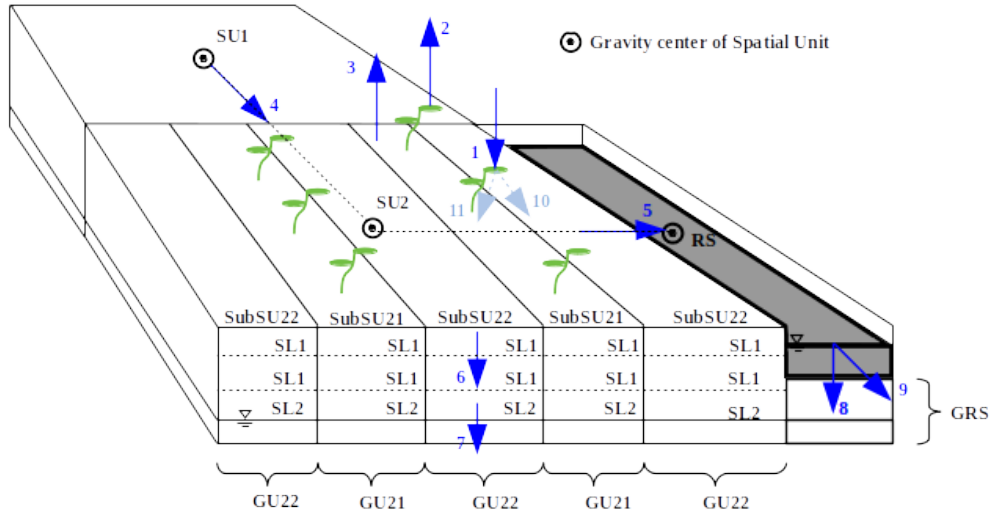


FIGURE 9 – Flux hydrologiques principaux représentés dans MHYDAS-Pesticides.

## 5.1 Partition de l'évapotranspiration potentielle et calcul de l'évapotranspiration réelle

Une fois l'évapotranspiration potentielle  $ET_o$  renseignée (section 3.1.2), MHYDAS-Pesticides effectue une partition de l'évaporation et de la transpiration potentielles selon le couvert végétal de la sous-unité de surface (section 4.3.2) et un coefficient d'extinction. Ainsi, en suivant la loi de Beer-Lambert, l'évaporation potentielle et la transpiration potentielle sont définies selon les équations (14) et (15).

$$E_P = ET_o e^{-(\alpha_{ET_o} LAI_{SubSU})} \quad (14)$$

$$T_P = ET_o - E_P \quad (15)$$

avec :

$E_P$  : taux d'évaporation potentielle ( $m^3 m^{-3} s^{-1}$ ),

$T_P$  : taux de transpiration potentielle ( $m^3 m^{-3} s^{-1}$ ),

$\alpha_{ET_o}$  : coefficient d'extinction pour la partition de l' $ET_o$ .

### Note

- La partition de l'évapotranspiration potentielle est basée sur l'indice de surface foliaire total de la sous-unité de surface, c'est à dire la somme de l'indice de la culture et des adventices.

Suite à la partition, la transpiration réelle est calculée à partir du terme puits  $Sk^W$ . Ce dernier est la quantité d'eau prélevée par la plante par unité de volume de sol et par unité de temps (Feddes et al. 1978 cités par Šimůnek et al. 2013).

$$Sk^W(h) = \mathcal{A}(h) S_P \quad (16)$$

avec :

$\mathcal{A}$  : coefficient de stress d'eau ( $0 \leq \mathcal{A} \leq 1$ ),

$S_P$  : taux d'absorption d'eau potentiel ( $m^3 m^{-3} s^{-1}$ ).

#### Notes

- $\mathcal{A}(h)=1$  correspond à une absence de stress hydrique, et  $\mathcal{A}(h)=0$  correspond à des états hydriques du sol proche de la saturation ou sous le point de flétrissement où les conditions de stress hydrique sont maximales.
- Le coefficient de stress d'eau est calculé avec la fonction de réponse au stress de Feddes. Cette fonction n'inclue pas le stress osmotique. Une description élargie et les paramètres de cette fonction sont détaillés dans Feddes et al (1978) et Šimůnek et Šejna (2018).

$S_P$  est exprimé selon la distribution spatiale des racines, qui représente l'évolution de la profondeur racinaire par rapport à la profondeur du sol. Cette densité peut être constante ou varier en temps et en espace.

$$S_P = \mathcal{B}(z) T_P \quad (17)$$

avec :

$\mathcal{B}$  : densité relative de racines,

#### Notes

- MHYDAS-Pesticides considère une distribution constante en temps et en espace pour la culture de la parcelle. D'autres représentations de la densité racinaire sont en cours de développement.
- MHYDAS-Pesticides simule le taux d'absorption d'eau potentiel selon les caractéristiques racinaires de la culture. L'absorption des adventices est en cours de développement.

La transpiration réelle est déterminée en intégrant le terme puits sur l'ensemble de la profondeur racinaire :

$$T_R = T_P \int_{L_r} \mathcal{A}(h, z) \mathcal{B}(z) dz \quad (18)$$

avec :

$L_r$  : profondeur racinaire ( $m$ ).

$T_R$  : taux de transpiration réelle ( $m s^{-1}$ ).

## 5.2 Transfert d'eau dans les sols (infiltration) et genèse du ruissellement



### 5.2.1 Les équations de transfert d'eau

L'infiltration est définie comme le mouvement de l'eau pénétrant le milieu poreux du sol (saturé ou non-saturé) depuis la surface et le ruissellement comme la part des précipitations qui n'est pas absorbée par le sol lors de l'infiltration (Chahinian 2004). La répartition des précipitations entre infiltration et ruissellement suppose une estimation précise de l'état hydrique à la surface du sol. Afin de pouvoir estimer cet état de manière suffisamment précise sur une succession de phases d'infiltration et de redistribution de l'eau dans le profil du sol, le transfert d'eau dans le sol a été représenté par une approche mécaniste en résolvant l'équation de Richards, combinaison de l'équation de conservation de la masse (19) et de l'équation de flux de Darcy (20).

$$\partial_t \theta = -\partial_z q^W - Sk^W \quad (19)$$

$$q^W = -K_z(h) \partial_z (h - z) \quad (20)$$

avec :

$t$  : temps ( $s$ ),

$z$  : profondeur dans la colonne du sol ( $m$ ),

$\theta$  : valeur moyenne de la teneur en eau dans le sol ( $m^3 m^{-3}$ ),

$q^W$  : flux d'eau dans le sol ( $m s^{-1}$ ),

$Sk^W$  : terme puits / source ( $m^3 m^{-3} s^{-1}$ ),

$h$  : pression matricielle dans le sol ( $m$ ),

$K_z$  : conductivité hydraulique dans le sol ( $m s^{-1}$ ).

La résolution de cette équation nécessite de connaître les relations entre  $\theta$ ,  $h$  et  $K_z$ . Ces relations  $\theta(h)$  et  $K(h)$  sont exprimées en utilisant le modèle hydrodynamique de Mualem-van Genuchten modifié (Schaap, Genuchten (2005)).

Lorsque le sol se sature en surface, une rétention superficielle peut se former et une lame d'eau  $h_{\text{surf}}$  peut se développer. Son évolution est régie par l'équation (21).

$$\text{à } z = 0 \quad \partial_t H = q_{\text{prec}} - q_{\text{evap}} - q^W \quad (21)$$

avec :

$q_{\text{prec}}$  : intensité des précipitations ( $m s^{-1}$ ),

$q_{\text{evap}}$  : intensité de l'évaporation ( $m s^{-1}$ ),

$H$  : hauteur de la lame d'eau à la surface du sol ( $m$ ).

L'infiltration correspond au flux calculé à la surface du sol et le ruissellement est la hauteur de précipitations ne pouvant être infiltrée par le sol lorsque la lame d'eau de surface atteint le seuil  $h_{\text{maxPond}}$ .

La condition à la limite de la colonne de sol est une condition de type drainage libre :

$$\text{à } z = z_{\text{max}} \quad q_W = K_z \quad (22)$$

### Note

- Dans MHYDAS-Pesticide, la conductivité hydraulique à saturation, nécessaire pour le calcul de la conductivité hydraulique dans l'équation de Darcy, est une variable estimée par l'approche décrite dans la section efks.

### 5.2.2 Principes généraux de la méthode de résolution

Les équations de transfert d'eau dans le sol sont résolues par le modèle WATSFAR (Crevoisier, Voltz (2013)) qui se base sur une méthode numérique de résolution rapide et robuste développée par Ross (2003).

Les principes généraux de la méthode numérique consiste tout d'abord à discrétiser les variables et les équations sur un maillage de la colonne de sol, composé de  $n$  strates (ou cellules).

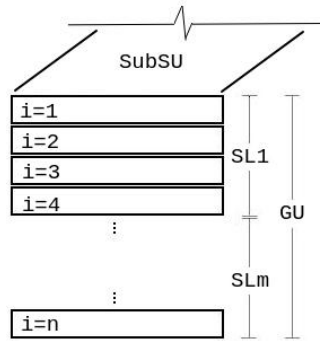


FIGURE 10 – Configuration des strates de sol en relation avec les horizons pédologiques (SL) dans MHYDAS-Pesticides.

En intégrant l'équation de conservation de la masse (19) sur un pas de temps et sur chaque strate du sol on obtient :

$$\Delta z_i [\theta_i(t + \Delta t) - \theta_i(t)] = \int_t^{t+\Delta t} [q_{i-1}^W - q_i^W - \Delta z_i S k_i^W] dt \quad (23)$$

avec :

$i$  : indice des strates du sol,

$\Delta t$  : pas de temps (s),

$\Delta z_i$  : épaisseur de la strate  $i$ .

Afin d'exprimer l'intégrale en temps de l'équation (23), le flux Darcien à l'interface de 2 strates de sol est linéarisé en fonction de leurs états hydriques (teneur en eau en zone non-saturée et pression matricielle en zone saturée). L'équation (24) est exprimée en zone non-saturée :

$$q_i^W(t + \sigma_R \Delta t) = q_i^W(t) + \sigma_R \left( \frac{\partial q_i^W(t)}{\partial S e_i} \Delta S e_i + \frac{\partial q_i^W(t)}{\partial S e_{i+1}} \Delta S e_{i+1} \right) \quad (24)$$

avec sur chaque strate  $i$  :  $\theta_S$  : la teneur en eau à saturation dans le sol ( $m^3 m^{-3}$ ),

$\theta_R$  : la teneur en eau résiduelle dans le sol ( $m^3 m^{-3}$ ),  
 $Se = \frac{\theta_s - \theta}{\theta_s - \theta_R}$  : l'humidité relative,  
 $\sigma_R$  : coefficient de linéarisation des flux selon la méthode de Ross ([0, 1]).

En combinant les équations précédentes, on obtient un système linéaire de  $n$  équations suivant :

$$a_i \Delta t \Delta Se_{i-1} + (b_i \Delta t - m_i) \Delta Se_i + c_i \Delta t \Delta Se_{i+1} + d_i \Delta t = 0 \quad (25)$$

$$\text{avec } \begin{cases} m_i &= \Delta z_i (\theta_{si} - \theta_{ri}) \\ a_i &= \sigma_R \frac{\partial q_{i-1}^W}{\partial \theta_{i-1}} \\ b_i &= \sigma_R \left( \frac{\partial q_{i-1}^W}{\partial \theta_i} - \frac{\partial q_i^W}{\partial \theta_i} \right) \\ c_i &= -\sigma_R \frac{\partial q_i^W}{\partial \theta_{i+1}} \\ d_i &= (q_{i-1}^W - q_i^W) \end{cases} \quad (26)$$

Les inconnues du système sont remplacées par la pression matricielle en zone saturée.

La résolution de ce système linéaire permet de déterminer l'évolution de l'état hydrique de chaque strate du sol entre l'instant  $t$  et  $t + \Delta t$ . Le pas de temps  $\Delta t$  est adaptatif dans la méthode de Ross. Il est calculé en fonction de l'état hydrique du système selon la formule (27). Il peut ainsi être réduit dans des conditions de forts gradients hydriques afin de mieux capter la dynamique du système ou augmenté lorsque les gradients sont plus faibles afin de réduire le temps de calcul.

$$\Delta t = \frac{\Delta S_{\max}}{\left\| \frac{q_{W_{i-1}} - q_{wi}}{\Delta z_i (\theta_{si} - \theta_{ri})} \right\|_{\max}} \quad (27)$$

avec :

$\Delta Se_{\max}$  : la variation d'humidité relative maximale admise.

#### Note

- Les étapes de la méthode Ross ne sont pas entièrement détaillées ici. Des descriptions approfondies concernant le choix du pas de temps, les développements appliqués aux conditions aux limites, la variabilité du milieu saturé et le formalisme mathématique sont données dans Ross (2003).

### 5.3 Écoulements de surface sur les parcelles

La lame d'eau ruissellante résultant du refus à l'infiltration sur les unités de surface SU est propagée vers l'unité spatiale en aval (fonction de transfert), telle que définie par la topologie, qui peut être une unité de surface (SU), un bief (RS) ou une portion de route (RU).

### Note

- Qu'ils soient parcellaires, sur les routes ou le long du réseau hydrographique, les écoulements de surface dans MHYDAS-Pesticides sont approchés par l'onde diffusante et résolus selon la méthode d'Hayami. Les unités de surface (SU), les portions de routes (RU) et les biefs (RS) sont traitées séparément, par classe d'unités, en suivant l'ordre de traitement défini par classe.

On obtient ainsi l'équation de l'onde diffusante qui s'écrit :

$$\frac{\delta Q}{\delta t} = -C \times \frac{\delta Q}{\delta x} + D \delta \frac{\delta^2 Q}{\delta x^2} \quad (28)$$

avec :

$Q$  : débit d'eau propagé ( $m^3 s^{-1}$ ),

$C$  : célérité ( $m s^{-1}$ ),

$D$  : diffusivité ( $m^2 s^{-1}$ ).

Une autre simplification généralement admise est de considérer que la célérité  $C$  et la diffusivité  $D$  sont indépendantes du temps. L'onde diffusante peut alors être résolue analytiquement selon la méthode d'Hayami (Moussa 1996 ; Moussa et al. 2011).

Les deux paramètres principaux du modèle d'onde diffusante ( $C$  et  $D$ ) sont définis selon la pente et la rugosité de l'unité spatiale considérée en utilisant la relation de Manning-Strickler :

$$C = C_u \times \sqrt{\frac{\beta}{\beta_m}} \times \frac{n_m}{n} \quad (29)$$

$$D = D_u \times \frac{\beta}{\beta_m} \times \frac{n_m}{n} \quad (30)$$

avec :

$n$  : coefficient de Manning-Strickler de l'unité spatiale ( $s^1 m^{-1/3}$ ),

$n_m$  : moyenne des coefficients de Manning-Strickler  $n$  d'une classe d'unité spatiale ( $s^1 m^{-1/3}$ ),

$\beta$  : pente moyenne de l'unité spatiale ( $m m^{-1}$ ),

$\beta_m$  : moyennes des pentes moyennes  $\beta$  d'une classe d'unité spatiale ( $m m^{-1}$ ),

$C_u$  : célérité moyenne d'une classe d'unité spatiale ( $m s^{-1}$ ),

$D_u$  : diffusivité moyenne d'une classe d'unité spatiale (SU) ( $m^2 s^{-1}$ ).

L'ensemble de ces paramètres et attributs spatiaux sont définis pour toutes les  $SU$ .

Sur les unités de surface, c'est la lame d'eau ( $H$ ), qui est propagée entre les centres de gravité d'une unité de surface (SU) et son unité en aval qui peut être une autre SU, un bief (RS) ou une portion de route (RU). L'équation 28 s'écrit alors comme un produit de convolution de la lame d'eau ( $H$ ) par le noyau d'Hayami  $K(t)$  :

$$Q_{SU}(t) = \frac{d_f}{2 \times (\pi \times D)^{1/2}} \times \exp^{\frac{C \times d_f}{2 \times D}} \times \int_0^t H(t - \tau) \times A_{SU} \times \frac{\exp^{\frac{C \times d_f}{4 \times D} \times \left( \frac{d_f}{C \times \tau} + \frac{C \times \tau}{d_f} \right)}}{\tau^{3/2}} \delta\tau \quad (31)$$

avec :

$Q_{SU}(t)$  : débit d'eau propagé par l'unité de surface en amont à l'instant  $t$  ( $m^3 s^{-1}$ ),

$d_f$  : distance entre les centres de gravité des deux unités spatiales ( $m$ ),

$A_{SU}$  : aire de l'unité spatiale de surface (en amont) ( $m^2$ ),

$H$  : hauteur de la lame d'eau à la surface du sol ( $m$ ),

$\tau$  : temps de calcul interne à la convolution ( $s$ ),

$t$  : temps de calcul de la simulation ( $s$ ).

Le noyau d'Hayami s'écrit :

$$K(t) = \frac{d_f}{2 \times (\pi D)^{1/2}} \times \frac{\exp^{\frac{C d_f}{4 D} \times \left( 2 - \frac{d_f}{C t} - \frac{C t}{d_f} \right)}}{t^{3/2}} \quad (32)$$

#### Notes

- La convolution exprimée dans l'équation 31 est réalisée par intégration numérique.
- La rugosité et donc la valeur du coefficient de Manning-Strickler  $n$  des unités de surface dépend aussi des états de surface (section 4). Pour autant, la présente version de MHYDAS-Pesticides ne prend pas en compte la variation temporelle de ce paramètre en même temps que les états de surface.

## 5.4 Écoulements sur les routes

Les routes sont considérées comme imperméables. Aussi les écoulements simulés sur les routes correspondent uniquement à des écoulements de surface en supposant que toute la pluie tombant sur une portion de route (RU) ruisselle. La propagation est réalisée de la même façon que sur les parcelles, selon l'équation 28. La résolution est également réalisée avec la méthode d'Hayami. La propagation est réalisée sur un unique débit entrant sur l'unité de route, alimenté par la pluie et les apports latéraux des unités situées à l'amont (écoulement de surface sur les SU ou d'autres unités de route). La célérité ( $C$ ) et la diffusivité ( $D$ ) sont calculées à partir des pentes et des rugosités des unités de routes.

## 5.5 Écoulements dans le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique joue un rôle majeur sur les flux d'eau durant les périodes de crue. Pendant ces périodes, les processus de transfert dans le réseau, comprenant l'infiltration, sont pris en compte, tels que décrits dans la section 5.5.1. Durant les périodes entre les crues, un bilan hydrique du sol du réseau est calculé pour estimer l'évolution de la teneur en eau du sol du réseau dont la connaissance est importante du fait de la dépendance de la dégradation des pesticides à l'humidité du sol. Il est décrit dans la section 5.5.2.

### 5.5.1 Écoulements de surface dans le réseau hydrographique

Les écoulements dans les biefs,  $RS$ , sont calculés sur le même principe que sur les unités de surface si ce n'est que ce sont les débits qui sont directement propagés et non la lame d'eau. Un calcul préalable du débit entrant dans chaque bief est réalisé avant la propagation. Les entrées comprennent les apports latéraux correspondant à la pluie, aux écoulements de surface en provenance des SU et des RU et, hormis pour les biefs en tête de réseau, le débit amont dans le réseau ; les pertes sont celles liées à l'infiltration. Pour simplifier, les apports latéraux sont supposés atteindre le réseau à l'entrée du bief tandis que les pertes par infiltration sont rapportées à la sortie du bief. Le débit entrant dans un RS s'écrit :

$$Q_{in_{RS}} = \sum_{RS_{up}} Q + \sum_{SU_{up}} Q + \frac{RR * A_{RS}}{\Delta t} \quad (33)$$

avec :

$Q_{in_{RS}}$  : débit à l'entrée du bief ( $m^3 s^{-1}$ ),

$\sum_{RS_{up}}$  et  $\sum_{SU_{up}}$  : une somme respectivement sur les biefs (RS) et unités de surface (SU) amont,

$RR$  : hauteur de pluie ( $m$ ),

$A_{RS}$  : aire de l'unité de bief ( $m^2$ ).

Dans le réseau, l'équation 28 s'écrit comme un produit de convolution de l'hydrogramme d'entrée de surface du bief par le noyau d'Hayami  $K(t)$  :

$$O(t) = \Phi(t) - (I(t) - \Phi(t)) * K(t) \quad (34)$$

Le symbole (\*) représente le produit de convolution.  $I(t)$  et  $O(t)$  sont respectivement l'hydrogramme d'entrée moins le débit de base et l'hydrogramme de sortie moins le débit de base. La présente version de MHYDAS-Pesticides ne prenant pas en compte l'exfiltration dans les biefs et considérant les apports latéraux à l'entrée du bief, l'équation 34, se simplifie de la façon suivante :

$$Q_{out_{RS}}^*(t) = Q_{in_{RS}}(t) * K(t) \quad (35)$$

avec :

$Q_{out_{RS}}^*$  : débit théorique sortant dans un bief en l'absence d'infiltration ( $m^3 s^{-1}$ ).

Le noyau d'Hayami s'écrit  $K(t)$  :

$$K(t) = \frac{L}{2 \times (\pi D)^{\frac{1}{2}}} \times \frac{\exp\left(\frac{CL}{4B} \times \left(2 - \frac{L}{Cl} - \frac{Cl}{L}\right)\right)}{t^{\frac{3}{2}}} \quad (36)$$

avec :

$L$  : longueur du bief ( $m$ ).

Un flux d'infiltration potentielle sur l'ensemble de la section mouillée du bief, correspondant à un flux d'infiltration en condition d'apport d'eau non limitante, est approchée à l'aide du métamodèle décrit par l'équation 37. Il a été obtenu à partir d'une méta-analyse des flux d'infiltration bi-dimensionnels dans le sol non saturé sous un fossé rectangulaire pour différentes géométries de section transversale de fossés, charge

d'eau et propriétés de sol. Les détails de cette analyse sont disponibles dans Bailly et al. (2015).

$$q_{inf}^* = aK_s + b \quad (37)$$

avec :

$q_{inf}^*$  : flux potentiel d'infiltration sur la section mouillée du bief ( $m s^{-1}$ ),

$a$  et  $b$  : paramètres empiriques du métamodèle d'infiltration fixés respectivement à 1.58 (-) et  $1.64e-5 m s^{-1}$ .

L'infiltration est supposée s'effectuer au flux  $q_{inf}^*$  sur l'ensemble de la surface mouillée et sur tout le pas de temps  $\Delta t$  tant que le débit à la sortie du bief reste positif sinon il est limité de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \text{si } q_{inf}^* WS \leq Q_{out_{RS}}^*, q_{inf} &= q_{inf}^* \\ \text{sinon } q_{inf} &= \frac{Q_{out_{RS}}^*}{WS} \end{aligned} \quad (38)$$

avec :

$WS$  : la surface mouillée du fossé (incluant le lit et les berges) ( $m^2$ ),

$q_{inf}$  : flux d'infiltration moyen sur l'aire mouillée du bief ( $m s^{-1}$ ).

Le débit sortant du bief prenant en compte les pertes par infiltration,  $Q_{out_{RS}}$  ( $m^3 s^{-1}$ ), est ensuite déduit :

$$Q_{out_{RS}}(t) = Q_{out_{RS}}^*(t) - q_{inf}(t) WS(t) \quad (39)$$

La hauteur d'eau  $H$  correspondant au débit  $Q_{out_{RS}}$  est ensuite calculée à l'aide des équations de Manning-Strickler, sous l'hypothèse d'un fossé de section rectangulaire.

$$Q_{out_{RS}} = \frac{\sqrt{\beta R^{2/3} w L}}{n} \quad \text{avec } R = \frac{wL}{w + 2L} \quad (40)$$

avec :

$R$  : le rayon hydraulique du bief ( $m$ ).

### 5.5.2 Bilan hydrique simplifié

Le bilan hydrique simplifié permet de simuler l'évolution de la teneur en eau dans le sol du fossé, que l'on suppose nu. Le sol du fossé est représenté comme une superposition d'un réservoir superficiel et d'un réservoir profond communiquants, de respectivement 0.02 et 0.08 m d'épaisseur. Sur un pas de temps, le bilan est réalisé en deux étapes en calculant d'abord les flux verticaux descendants (drainage) puis les flux ascendants (évaporation uniquement, le sol étant supposé nu). Ce modèle ne permet pas de calculer le refus à l'infiltration. Le drainage est défini comme le trop plein des réservoirs et s'écrit respectivement selon les équations 41 et 42 pour les réservoirs superficiel et profond.

$$D_{top}(t) = \max(0, S_{w,top}(t-1) + RR(t) - S_{w,top}^{max}) \quad (41)$$

et

$$D_{bot}(t) = \max(0, S_{w,bot}(t-1) + D_{top}(t) - S_{w,bot}^{max}) \quad (42)$$

On peut calculer une hauteur d'eau stockée dans les compartiments superficiel et profond, respectivement  $S_{w,top}^*$  et  $S_{w,bot}^*$  correspondant à une hauteur d'eau dans le sol après infiltration mais avant évaporation, telles que définies par les équations 43 et 44.

$$S_{w,top}^* = \min(S_{w,top}(t-1) + RR(t), S_{w,top}^{max}) \quad (43)$$

$$S_{w,bot}^* = \min(S_{w,bot}(t-1) + D_{top}(t), S_{w,bot}^{max}) \quad (44)$$

et :

$D_{top}$  : hauteur d'eau drainée entre le compartiment superficiel et le compartiment profond du sol d'un bief ( $m$ ),

$D_{bot}$  : hauteur d'eau drainée depuis le compartiment profond du sol d'un bief ( $m$ ),

$S_{w,top}$  : stock en eau dans le compartiment superficiel du sol d'un bief ( $m$ ),

$S_{w,bot}$  : stock en eau dans le compartiment profond du sol d'un bief ( $m$ ),

$S_{w,top}^{max}$  : stock en eau maximal dans le compartiment superficiel du sol d'un bief, correspondant au stock en eau à la teneur à saturation  $\theta_S$  ( $m$ ),

$S_{w,bot}^{max}$  : stock en eau maximal dans le compartiment profond du sol d'un bief ( $m$ ), correspondant au stock en eau à la teneur à saturation  $\theta_S$ .

L'évaporation réelle et sa distribution verticale dans le profil de sol sont déterminées empiriquement à partir de l'évaporation potentielle du sol, de son degré de saturation et d'un coefficient de distribution, selon les fonctions proposées par Van Keulen (1975).

$$E_s(t) = [0.075 + 1.2 \exp(-0.3/SS(t))]E_{s,0} \quad (45)$$

$$\alpha_i^*(t) = SS_i(t) \exp(-ke z_i) \quad (46)$$

$$E_{s,i}(t) = \frac{\alpha_i^*(t)}{\sum \alpha_i^*} E_s(t) \quad (47)$$

avec :

$$SS(t) = \frac{(S_{w,top}^* - S_{w,top}^{min}) + (S_{w,bot}^* - S_{w,bot}^{min})}{S_w^{max} - S_w^{min}} \quad (48)$$

et :  $E_s$  : Evaporation potentielle ( $m$ ),

$SS$  : Degré de saturation du sol (-),

$\alpha_i^*$  : coefficient de distribution de l'évaporation du compartiment  $i$ ,  $i$  pouvant être le compartiment superficiel ou profond ( $m^{-1}$ ),

$z_i$  : profondeur au centre du compartiment  $i$  ( $m$ ),

$S_w^{max}$  : Stock en eau maximal dans le sol d'un bief, correspondant au stock en eau à la teneur à saturation  $\theta_S$  ( $m$ ),

$S_w^{min}$  : Stock en eau minimal dans le sol d'un bief, correspondant au stock en eau à la teneur résiduelle ( $m$ ).

Les teneurs en eau dans le compartiment superficiel et profond sont ensuite respectivement calculées de la façon suivante :

$$\theta_{top}(t) = \max\left(\frac{S_{w,top}^* - E_{s,top}(t)}{e_{top}}, \theta_r\right) \quad (49)$$



$$\theta_{bot}(t) = \max\left(\frac{S_{w,bot}^* - E_{s,bot}(t)}{e_{bot}}, \theta_r\right) \quad (50)$$

avec :

$e_{top}$  : épaisseur du compartiment superficiel ( $m$ ),

$e_{bot}$  : épaisseur du compartiment profond ( $m$ ).

## 6 Représentation des processus de devenir des pesticides

### 6.1 Distribution de l'application

Suite au phénomène de dérive de l'application qui soustrait une partie de la masse appliquée de *pop* (voir section 3.2.2), le sol et les feuilles de la culture partagent la quantité restante  $m_a$ . Cette quantité est distribuée entre végétation et sol selon la fraction de couverture végétale de la culture (51).

$$f_{gc} = e^{-\alpha LAI_c} \quad (51)$$

avec :

$f_{gc}$  : fraction de couverture végétale,

$\alpha$  : coefficient d'extinction pour le partage de *pop* entre le sol et les feuilles.

Ainsi, pour cette fonction résultante de la loi de Beer-Lambert, une valeur de 0 pour le coefficient d'extinction ( $\alpha$ ) bascule toute la masse de la molécule appliquée sur le sol, ce qui permet de représenter le cas d'application d'herbicides.

Une deuxième fonction a été développée pour calculer  $f_{gc}$  si l'utilisateur dispose des informations sur le type de pulvérisateur ou équipement utilisé et sa qualité de réglage. Cette fonction empirique ajuste la fraction de couverture végétale maximale et minimale ( $f_{gc_{max}}$  et  $f_{gc_{min}}$ ) avec l'évolution de  $LAI_c$ . Les valeurs de  $f_{gc_{max}}$  et  $f_{gc_{min}}$  sont obtenues en pondérant les valeurs de référence expérimentales de l'équipement choisi, par la qualité de réglage (Louchart 2011).

$$f_{gc_{max}} = \beta Good_{max} + (1 - \beta) Bad_{max} \quad (52a)$$

$$f_{gc_{min}} = \beta Good_{min} + (1 - \beta) Bad_{min} \quad (52b)$$

avec :

$f_{gc_{max}}$  : fraction de couverture végétale maximale,

$f_{gc_{min}}$  : fraction de couverture végétale minimale,

$\beta$  : qualité de réglage de l'équipement ( $0 \leq \beta \leq 1$ ),

$Good_{max}$  : valeur de référence expérimentale maximale pour un bon réglage de l'équipement,

$Good_{min}$  : valeur de référence expérimentale minimale pour un bon réglage de l'équipement,

$Bad_{max}$  : valeur de référence expérimentale maximale pour un mauvais réglage de l'équipement,

$Bad_{min}$  : valeur de référence expérimentale minimale pour un mauvais réglage de l'équipement.

Les valeurs de  $Good_{max}$ ,  $Good_{min}$ ,  $Bad_{max}$  et  $Bad_{min}$  qui ont été utilisées pour l'équation 54, et les types

d'équipements d'application de *pop* disponibles sont affichés à l'Annexe C.

Ainsi l'équation 51 devient :

$$f_{gc} = f_{gc_{max}} (1 - k LAI_c) \quad (53)$$

avec  $k$  une valeur constante associée à  $LAI_{c_{max}}$  :

$$k = \frac{1}{LAI_{c_{max}}} \left( 1 - \frac{f_{gc_{min}}}{f_{gc_{max}}} \right) \quad (54)$$

Estimée  $f_{gc}$  par l'équation 53 ou l'équation 55, le partage entre le sol et le feuillage de la culture est défini de cette façon :

$$m_s = f_{gc} m_a \quad (55)$$

$$m_f = (1 - f_{gc}) m_a \quad (56)$$

avec :

$m_s$  : masse effective de *pop* appliquée sur le sol de la sous-unité spatiale de surface ( $kg$ ),

$m_f$  : masse effective de *pop* appliquée sur la culture de la sous-unité spatiale de surface ( $kg$ ).

## 6.2 Devenir dans le couvert végétal

### 6.2.1 Lessivage foliaire

Si un événement pluvieux survient peu de temps après le traitement de la parcelle, le pesticide intercepté par le feuillage de la culture pourra être lessivé. Le modèle choisi pour représenter le lessivage foliaire est décrit par l'équation suivante (Willis et al. 1994) :

$$Q_{less}(t) = Q_{int}(t) e^{-(k_{less} R(t))} \quad (57)$$

Avec :

$Q_{less}$  : quantité de pesticide lessivé ( $kg$ ).

$Q_{int}$  : quantité initiale interceptée par le feuillage ( $kg$ ).

$R(t)$  : cumul de précipitation ( $m$ ).

$k_{less}$  : facteur de lessivage ( $m^{-1}$ ).

## 6.2.2 Dégradation

La dégradation des pesticides sur le feuillage est représentée par une loi de cinétique du 1er ordre :

$$d_t Q_{\text{feuillage}}(t) = -k Q_{\text{feuillage}}(t) \quad (58)$$

avec :

$Q_{\text{feuillage}}$  : quantité de pesticides sur le feuillage ( $kg$ ),

$k$  : vitesse de dégradation.

La vitesse de dégradation est reliée au temps de demi-vie du pesticide DT50 par la relation suivante :

$$k = \frac{\ln(2)}{DT50} \quad (59)$$

## 6.3 Devenir dans le sol

### 6.3.1 L'équation de transport réactif des pesticides

L'équation de transfert de pesticides dans le sol est régie par l'équation de conservation de masse (60) combinée à l'expression au flux de pesticides (61). Le terme puits (62) de l'équation tient compte du prélèvement éventuel de pesticides par racine ainsi que de la quantité dégradée selon une cinétique de 1ère ordre :

$$\partial_t s = -\partial_z q^S - Sk^S \quad (60)$$

$$q^S(\theta, c) = (D_L |q^W| + D_0 \theta \tau) \partial_z c + q^W c \quad (61)$$

$$Sk^S(\theta, c) = Sk_{\text{degrad}}^S + Sk_{\text{uptake}}^S \quad (62)$$

Avec :

$s$  : teneur en pesticide du sol ( $kg m^{-3}$ ).

$q^S$  : flux de pesticides ( $kg m^{-2} s^{-1}$ ).

$Sk^S$  : terme puits de pesticides ( $kg m^{-3} s^{-1}$ ).

$c$  : concentration du pesticide dans l'eau du sol ( $kg m^{-3}$ ).

$D_L$  : coefficient de dispersivité ( $m$ ).

$D_0$  : coefficient de dispersion du pesticide dans l'eau pure ( $m^2 s^{-1}$ ).

$\tau$  : tortuosité du milieu.

**6.3.1.1 Adsorption** La teneur en pesticides du sol prend en compte le pesticide en solution dans l'eau du sol et la quantité de pesticide adsorbée dans la matrice poreuse du sol.

$$s = c\theta + \rho s_A \quad (63)$$

Avec :

$\rho$  : densité apparente ( $kg m^{-3}$ ).

$s_A$  : teneur en pesticide adsorbée ( $m^3 m^{-3}$ ).

La quantité de pesticide adsorbée dans le sol est estimée par des modèles d'équilibre instantané, le modèle linéaire (64) ou le modèle de Freundlich (65) :

$$s_A = K_d c \quad (64)$$

$$s_A = K_f c^\beta \quad (65)$$

Avec :

$K_f$  et  $K_d$  : coefficient d'adsorption dans le sol ( $m^{-3} kg$ ).

$\beta$  : exposant de Freundlich.

**6.3.1.2 Dégradation** Le premier composant du terme puits de pesticides de l'équation (62) est la dégradation du pesticide. Elle est représentée, comme décrit à la section 6.2.2, par une cinétique du 1er ordre où la vitesse de dégradation peut-être réduite par un coefficient dépendant de l'humidité du sol (Walker (1974)). Ce coefficient d'atténuation prend la forme suivante :

$$Sk_{\text{degrad}}^S = k \theta c \quad (66)$$

$$k = \left( \frac{\theta}{\theta_{\text{ref}}} \right)^b \frac{\ln 2}{DT_{50}} \quad (67)$$

Avec :

$Sk_{\text{degrad}}^S$  : la quantité de pesticide dégradée ( $kg m^{-3} s^{-1}$ ),

$k$  : vitesse de dégradation ( $s^{-1}$ ),

$\theta_{\text{ref}}$  : humidité de référence ( $m^3 m^{-3}$ ),

$b$  : coefficient de Walker (-).

**6.3.1.3 Extraction des pesticides par les racines** Le second composant du terme (62) est le prélèvement de pesticides par les racines. Afin d'être capable de simuler une capacité plus ou moins importante du pesticide à être prélevé avec l'eau par les racines, le modèle utilisé est le suivant :

$$Sk_{\text{uptake}}^S = k_{\text{uptake}} Sk^W c \quad (68)$$

Avec :

$k_{\text{uptake}}$  : coefficient de pondération du prélèvement ( $[0 - 1]$ )

### 6.3.2 Flaquage en surface et hypothèse de mélange uniforme

Lorsque le flaquage apparait en surface, l'équation de conservation de la masse est réduite à :

$$\partial_t h_{\text{surf}} c_{\text{surf}} = q_{\text{appli}} - q^S(z=0) \quad (69)$$

$$(70)$$

Avec :  $c_{\text{surf}}$  : la concentration dans l'eau de flaquage.

$q_{\text{appli}}$  : le flux de masse correspondant à l'apport de pesticide en surface du sol.

Pour calculer la quantité de pesticides emportée par ruissellement, un mélange uniforme est supposé entre la quantité de pesticides contenue dans les premières couches de sol et l'eau de flaquage

$$Q_{S \text{ pond}} + Q_{S \text{ soil}} = h_{\text{surf}} c_{\text{eq}} + z_{\text{mix}} s(c_{\text{eq}}, \theta) \quad (71)$$

Avec :

$Q_{S \text{ pond}}$  : la quantité de pesticides contenu dans l'eau de flaquage ( $kg \ m^{-2}$ ).

$Q_{S \text{ soil}}$  : la quantité de pesticides contenu dans les premières couches de sol ( $kg \ m^{-2}$ ).

$c_{\text{eq}}$  : la concentration équivalente ( $kg \ m^{-3}$ ).

$z_{\text{mix}}$  : la profondeur de la couche de mélange uniforme.

### 6.3.3 Principes de résolution

L'équation de transport des pesticides ayant une forme similaire à celle du transfert d'eau, la méthode numérique de résolution présentée précédemment a été adaptée pour les pesticides. Le modèle WATSFAR calcule tout d'abord un pas de temps unique pour les 2 types d'équations à partir de l'état hydrique du système, il résoud ensuite l'équation de transfert d'eau au temps  $t$ , dont les solutions  $\theta(t)$   $q^W(t)$  vont permettre de renseigner et résoudre l'équation de transport de pesticides sur le même pas de temps. En cas de flaquage, l'équation (71) est également discrétisée et introduite dans le système linéaire.

## 6.4 Devenir des pesticides dans les écoulements de surface sur les parcelles

Le devenir des pesticides dans les écoulements de surface des parcelles comporte deux étapes : i) la mobilisation des pesticides par les eaux de ruissellement et ii) la propagation. Ces écoulements étant par nature très temporaires, on ne considère pas les autres processus de dissipation tels que la dégradation ou la volatilisation.

### 6.4.1 Mobilisation

La mobilisation des pesticides à la surface de la parcelle est intégrée à la résolution de l'équation de transfert de soluté en considérant l'hypothèse de mélange uniforme (voir section 6.3.2). Les principes ne seront donc pas repris dans cette partie.

### 6.4.2 Propagation

La propagation des solutés s'opère de façon analogue à celle de l'eau et est approchée à l'aide de l'onde diffusante 28, en remplaçant le débit d'eau par un flux massique :

$$\frac{\delta Q_s}{\delta t} = -C \times \frac{\delta Q_s}{\delta x} + D\delta \frac{\delta^2 Q_s}{\delta x^2} \quad (72)$$

avec :

$Q_s^*$  : flux massique propagé ( $kg s^{-1}$ ).

Le flux massique propagé à l'aide du noyau d'Hayami comprend à la fois la masse mobilisée sur la parcelle telle que décrit précédemment 6.4.1 et le flux massique en provenance des unités de surface (SU) situées à l'amont.

## 6.5 Devenir dans les écoulements de surface sur les routes

Les routes étant supposées imperméables et en l'absence de données de référence sur leur capacité de sorption, le stockage et la remobilisation de pesticides sur ces unités n'est pas prévu dans MHYDAS-Pesticides. Ainsi seul le transport est simulé, de la même façon que sur les unités de surface (eq. 72), si ce n'est que le flux propagé correspond uniquement au flux massique en provenance des unités à l'amont, qui correspondent soit à des unités de surface (SU), soit à des unités de routes (RU).

## 6.6 Devenir dans le réseau hydrographique

Les processus pris en compte pour simuler le devenir des pesticides dans le réseau hydrographique sont la dégradation dans les différents matériaux du fossé, le transport au cours des crues et les processus d'adsorption/désorption.

### 6.6.1 Dégradation

La dégradation des pesticides dans l'ensemble des matériaux sur lesquels les pesticides sont stockés est prise en compte selon les mêmes principes que dans la section 6.3.1.2. Un temps de demi-vie peut être défini par matériaux.

### 6.6.2 Transport

Le transport des pesticides le long du réseau hydrographique est réalisée en deux temps, après le calcul de la dégradation. Un transport conservatif est d'abord calculé puis corrigé de la sorption telle que décrite section 6.6.3. La propagation, comme sur les parcelles, est représentée avec l'équation de l'onde diffusante, par bief, et résolue à partir de la solution analytique d'Hayami et ses hypothèses (section 5.3). Dans ce cas, c'est un flux massique théorique conservatif qui est propagé, comme indiqué par les équations 73 et 74.

$$\frac{\delta Q_s^*}{\delta t} = -C \times \frac{\delta Q_s^*}{\delta x} + D\delta \frac{\delta^2 Q_s^*}{\delta x^2} \quad (73)$$

$$Q_s^* = Q_{s,in_{RS}} * K(t) \quad (74)$$

avec :

$Q_s^*$  : débit massique propagé sous l'hypothèse de transport conservatif ( $kg\ s^{-1}$ ),

$Q_{s,in_{RS}}$  : débit massique entrant dans un bief ( $kg\ s^{-1}$ ).

Le noyau d'Hayami est celui calculé pour la propagation de l'eau dans le réseau et donné équation 36. Le débit massique est par la suite corrigé de la sorption :

$$Q_s(t) = Q_s^*(t) - \frac{P_{sorb}(t) + P_{inf}(t) - P_{sorb}(t-1)}{\Delta t} \quad (75)$$

avec :

$P_{inf}(t)$  : masse de pesticide infiltrée dans un bief entre les temps  $t-1$  et  $t$  ( $kg$ ),

$P_{sorb}(t)$  : masse de pesticide sorbée dans un bief à la fin du pas de temps  $t$  ( $kg$ ),

La masse sorbée dans l'ensemble des matériaux du bief,  $P_{sorb}$ , est définie dans la section 6.6.3.

### 6.6.3 Sorption

La sorption des pesticides circulant dans le bief, est estimée en considérant  $Q_s^*$ , le flux de pesticides issu du calcul du transfert conservatif et en supposant que la colonne d'eau circulante est subdivisée en trois compartiments tels que schématisés Figure 11, avec :

- un compartiment en interaction avec le sol et les autres substrats jonchant la surface mouillée (délimitée en rouge et notée “wetted surface equilibrium zone”)
- un compartiment en interaction avec la végétation dans l'écoulement (délimitée en bleue et notée “vegetation equilibrium zone”)
- un compartiment dans lequel l'eau circule sans interaction avec les matériaux sorbants.

Ceci revient à considérer que les pesticides ont été en contact avec les substrats d'un unique compartiment sur la durée de leur passage dans le bief. Cette compartimentation est utilisée uniquement pour le calcul des équilibres de sorption ; la propagation est réalisée sur l'ensemble de la colonne d'eau et non par compartiment.

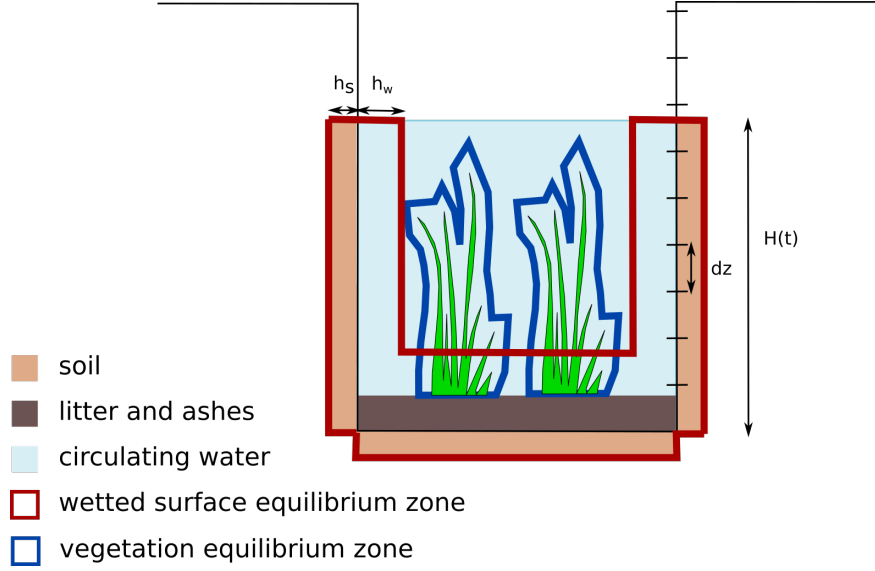


FIGURE 11 – Section de fossé présentant la compartimentation de la colonne d'eau.

Une concentration dans l'eau et les teneurs pour les substrats à l'équilibre sont donc calculées pour chaque compartiment, en supposant un mélange parfait au sein du compartiment, un équilibre instantané et la conservation de la masse par l'équilibre. Ce sont les même principes que ceux détaillés dans Dollinger et al. (2016). Ainsi, dans le compartiment en équilibre avec la surface mouillée (en rouge Fig. 11), l'eau est en équilibre avec le sol, les litières et les cendres, tandis que dans le compartiment en équilibre avec la végétation, l'eau du compartiment (en bleu, Fig. 11) est uniquement en équilibre avec la partie immergée de la végétation.

La masse de substrat prise en compte pour l'équilibre est calculée à chaque pas de temps, en fonction de la hauteur d'eau dans le fossé sur le pas de temps  $H(t)$  avant prise en compte de l'infiltration. Les litières, les cendres et la végétation vivante sont supposées se situer uniquement sur le lit du fossé (eq. 76), tandis que pour le sol, lit et berge contribuent à l'équilibre (eq. 77).

$$M_i(t) = L (2 \min(H(t), e_i) + w) f s_i d_i (1 - p_i) \quad (76)$$

$$M_{soil}(t) = h_s L (w + 2H(t)) \rho_{bulk} \quad (77)$$

avec :

$M_{soil}$  : masse de sol à l'équilibre ( $kg$ ),

$M_i$  : masse du substrat  $i$  à l'équilibre ( $kg$ ), avec  $i$  pouvant être de la litière (distinction possible entre litière peu transformée constituée de tiges, litière peu transformée constituée de feuilles, litière fortement décomposée (voir Dollinger et al. (2016) pour plus de détails)), des cendres ou de la végétation vivante,

$\rho_{bulk}$  : densité apparente du sol (-),

$e_i$  : épaisseur du substrat  $i$  ( $m$ ),

$w$  : largeur du bief (RS) ( $m$ ),

$p_i$  : porosité du substrat  $i$  (-),

$f s_i$  : taux de couverture du bief par le substrat  $i$  (-),



$d_i$  : densité du substrat  $i$  (-),

$h_s$  : épaisseur de sol en interaction avec l'eau et les pesticides sur la surface mouillée (m).

Le volume d'eau en interaction est donné par les équations 78 et 79 respectivement pour le compartiment en interaction avec la surface mouillée et avec la végétation vivante. Pour ce premier, il comprend i) le volume d'eau s'infiltrant sur le pas de temps, ii) l'eau circulant dans une couche d'eau d'épaisseur,  $h_w$ , iii) l'eau contenue dans la porosité de la litière, iv) l'eau contenue dans la porosité de la couche de sol d'épaisseur  $h_s$ . Ce volume est borné par le volume d'eau sortant du bief (par infiltration et par les écoulements de surface). Le volume d'eau interagissant avec la végétation vivante se limite à la porosité de la végétation modérée par la surface occupée par cette végétation.

$$V_{WS}(t) = \min(L w h_w + 2L h_w (H(t) - h_w) + V_{inf}, Q^*(t) \Delta t) + h_s L (w + 2H(t)) \theta_S \quad (78)$$

$$V_{LV}(t) = \min(Q^* \Delta t - V_{WS}(t), e_{LV} w L) f_{sLV} (1 - p_{LV}) \quad (79)$$

avec :

$h_w$  : épaisseur de la lame d'eau libre interagissant avec la surface mouillée (m).

$LV$  : en indice, marque la végétation vivante.

La masse de pesticides prise en compte pour l'équilibre dans le compartiment en interaction avec la surface mouillée comprend les pesticides déjà stockés dans le sol et les litières au début du pas de temps et les pesticides contenus dans l'eau circulante du compartiment,  $P_{WL,water}$ , qui correspond au premier terme de gauche dans l'équation 78.  $P_{WL,water}$  est défini comme une fraction du flux massique conservatif, la fraction correspondant au ratio entre le volume d'eau circulante dans le compartiment et le volume d'eau sortant du bief (équation 80). La masse de pesticide dans l'eau circulante en interaction avec la végétation est définie sur le même principe (eq. 81).

$$P_{WL,water}(t) = \frac{\min(L w h_w + 2L h_w (H(t) - h_w) + V_{inf}, Q^*(t) \Delta t)}{Q^*(t)} Q_s^*(t) \quad (80)$$

$$P_{LV,water}(t) = \frac{V_{LV}(t)}{Q_s^*(t)} \quad (81)$$

avec :

$P_{WL,water}$  : masse de pesticides dans l'eau circulante du compartiment en interaction avec la surface mouillée (kg),

$P_{LV,water}$  : masse de pesticides dans l'eau circulante du compartiment en interaction avec la végétation (kg).

La masse de pesticides stockés dans le sol d'un bief et contribuant à l'équilibre comprend le stock du lit du bief ainsi que celui sur la portion immergée des parois. Pour tenir compte de l'hétérogénéité verticale du stock en pesticide dans la paroi en lien avec la fluctuation du niveau de l'eau dans le fossé, le calcul du stock dans

les parois est discrétisé. Les deux parois sont supposées identiques. La discrétisation de la paroi est contrôlée par le paramètre  $\Delta z$  fixé par l'utilisateur (voir Fig. 11). Le nombre de cellules  $j$  participant à l'équilibre pour une hauteur d'eau dans le fossé  $H(t)$  est déterminé de la façon suivante :

$$(j - 1) \Delta z \leq H(t) \leq j \Delta z \quad (82)$$

avec :

$\Delta z$  : résolution spatiale verticale de la paroi du bief ( $m$ ).

La masse de pesticide stockée dans les parois et contribuant à l'équilibre au début du temps  $t$ ,  $P_{banks}$ , est définie dans l'équation 83, en considérant que la contribution des cellules partiellement saturées est proportionnelle à leur degré de saturation.

$$P_{banks}(t) = \sum_{i=0}^{j-1} S_{banks,i}(t-1) + S_{banks,j}(t-1) \frac{H(t) - (j-1) \Delta z}{\Delta z} \quad (83)$$

avec :

$P_{banks}$  : masse de pesticide stockée dans la paroi et participant à l'équilibre ( $kg$ ),

$S_{banks,i}$  : le stock en pesticides stockés dans la cellule  $i$  de la paroi ( $kg$ ).

La masse de pesticides stockés dans la végétation vivante et dans la litière et contribuant à l'équilibre est calculée de façon similaire. La même discrétisation verticale est adoptée. L'équilibre de sorption est calculé selon les équations 84 et 85, respectivement pour le compartiment en équilibre avec la surface mouillée et celui avec la végétation vivante.

$$C_{eq,WS}(t) = \frac{P_{soil}(t) + P_{litter}(t) + P_{WS,water}(t)}{Kd_{soil} M_{soil}(t) + Kd_{litter} M_{litter}(t) + V_{WS}(t)} \quad (84)$$

$$C_{eq,LV}(t) = \frac{P_{LV}(t) + P_{LV,water}(t)}{Kd_{LV} M_{LV}(t) + V_{LV}(t)} \quad (85)$$

avec :

$C_{eq,WS}$  : concentration massique à l'équilibre dans le compartiment en interaction avec la surface mouillée ( $kg m^{-3}$ ),

$P_i$  : masse totale de pesticide stockée dans le substrat  $i$  d'un bief et participant à l'équilibre ( $kg$ ),  $i$  pouvant être le sol, les litières, les cendres ou la végétation vivante,

$Kd_i$  : le coefficient de sorption d'un pesticide dans le substrat  $i$  ( $kg$ ).

Les stocks en pesticides après l'équilibre dans les parties immergées des différents substrats sont ensuite calculés selon les équations 86 pour le sol et les litières et 87 pour la végétation vivante.

$$P_{ii}^*(t) = Kd_{ii} C_{eq,WS}(t) M_{ii} \quad (86)$$

$$P_{LV}^*(t) = Kd_{LV} C_{eq,LV}(t) M_{LV} \quad (87)$$

avec :

$i_i$  pour le sol ou les litières.

L'eau s'infiltré à la concentration à l'équilibre dans le compartiment en interaction avec la surface mouillée,  $C_{eq,WS}$ , la masse de pesticides s'infiltrant peut donc être calculée de la façon suivante :

$$P_{inf}(t) = C_{eq,WS}(t) q_{inf}(t) WS(t) \Delta t \quad (88)$$

avec :

$P_{inf}$  : masse de pesticides s'infiltrant ( $kg$ ).

La masse totale de pesticides sorbée dans le fossé à la fin du pas de temps,  $P_{sorb}$  est la somme de toute les masses sorbées dans les différents matériaux du bief et s'écrit :

$$P_{sorb}(t) = P_{soil}(t) + P_{litter}(t) + P_{LV}(t) \quad (89)$$

La concentration moyenne en pesticide sortant du bief est finalement calculée selon l'équation 90 en supposant que les processus de transport dans le bief assurent une homogénéisation parfaite de la colonne d'eau.

$$C_{eq}(t) = \frac{Q_s^* \Delta t - P_{inf}(t) - \sum P_i^*(t)}{Q^* \Delta t} \quad (90)$$

## 7 Couplage des processus

### 7.1 Principes généraux du couplage

Le modèle MHYDAS-Pesticides-1.0 est porté par la plateforme OpenFLUID (<https://www.openfluid-project.org>). Dans celle-ci, les processus et leur méthode de résolution décrits dans cette notice sont représentés par un ou plusieurs simulateurs (code de calcul compilé qui se branche dynamiquement sur la plateforme). OpenFLUID gère l'évolution du temps de la simulation et met à disposition de chaque simulateur les variables dont il a besoin telles que calculées par les autres simulateurs en amont dans la séquence de couplage. La méthode de couplage proposée par le plateforme est séquentielle - non itérative (un simulateur après l'autre, sans boucle d'itération entre simulateurs).



l'ordre d'appel des simulateurs est le suivant :

- “land.surf-uz-sz.domain-generator.mhydass-watsfar” : pré-traitement du domaine,
- “water.atm-surf.rain-su.files” : distribution de la pluie sur unités de surface,
- “water.atm-surf.rain-ru.files” : distribution de la pluie sur les routes,
- “water.atm-surf.rain-rs.files” : distribution de la pluie sur le réseau hydrographique,
- “energy.atm-surf.temperature-data.files” : distribution de la température,
- “energy.atm-surf.global-radiation-data.files” : distribution de la radiation,
- “water.atm-surf.etp-data-su.files” : distribution de l'évapotranspiration de référence sur unités de surface,
- “energy.surf.rainfall-kinetic.zanchi-torri” : calcul de l'énergie cinétique de la pluie,
- “plant.canopy.lai-growth.empirical” : forçage du LAI de la vigne,
- “soil.surf.SSC-evolution.logistic-regression” : détermination de l'état de surface,
- “plant.surf.weeds-germination.hydrothermal-time” : germination des adventices,
- “plant.surf.weeds-growth.conductance” : croissance des adventices,
- “water.plant-surf.evapotranspiration-partition.extinction-coefficient” : partition évaporation / transpiration,
- “water.atm-surf.ep-data-rs.files” : distribution de l'évaporation potentielle sur le réseau hydrographique,
- “pop.plant-surf.application-partition.lai-beer-lambert” : application du pesticide et répartition entre le sol et la plante,
- “pop.plant.foliar-washoff” : lessivage du pesticide sur le feuillage de la culture,
- “pop.plant.degradation.first-order” : dégradation du pesticide sur le feuillage de la culture,
- “water.surf-uz-sz.pre-adapter.mhydass-watsfar” : adaptateur des variables eau requises par WATSFAR,
- “pop.surf-uz-sz.pre-adapter.mhydass-watsfar” : adaptateur des variables pesticides requises par WATSFAR,
- “water-pop.uz-sz.soil-transfer.watsfar-subsu” : résolution des équations de transfert eau et pesticide dans le sol,
- “water.surf-uz-sz.post-adapter.mhydass-watsfar” : adaptateur des variables eau produites par WATSFAR,
- “pop.surf-uz-sz.post-adapter.mhydass-watsfar” : adaptateur des variables eau produites par WATSFAR,
- “water.surf.transfer-su.hayami” : transfert du ruissellement sur les unités de surface,
- “water.surf.transfer-ru.hayami” : transfert du ruissellement sur les routes,
- “water.surf.infiltration-rs.FIPmetamodel-grs” : infiltration dans le réseau hydrographique,
- “water.surf.transfer-infiltration-rs.hayami” : transfert du ruissellement dans le réseau hydrographique en prenant en compte l'infiltration,
- “water.atm-surf.toptheta-control-rs.van-keulen-grs” : ajustement de la teneur en eau du sol dans le réseau hydrographique,
- “pop.surf.transfer-su.hayami” : transfert du pesticide sur les unités de surface,
- “pop.surf.transfer-ru.hayami” : transfert du pesticide sur les routes,
- “pop.surf.degradation-rs.first-order-grs” : dégradation du pesticide dans le réseau hydrographique,
- “pop.surf.transfer-infiltration-retention-rs.hayami-equilibrium-grs” : transfert du pesticide dans le réseau hydrographique en prenant en compte l'infiltration et la rétention

Les noms et les descriptions des variables sont disponibles dans les informations de chaque simulateur de

l'interface OpenFLUID-Builder. L'utilisation et la description de la plateforme OpenFLUID ne sont pas décrites dans ce document, veuillez-consulter le site dédié : <https://www.openfluid-project.org/>.

## 7.2 Pas de temps variable

OpenFLUID peut assurer l'échange des variables entre simulateurs sur des pas de temps constant ou variable, synchrone ou non. Les différentes versions antérieures de MHYDAS fonctionnaient toutes à pas de temps constant et synchrone. Le temps de calcul de chaque simulateur était pour cette version du même ordre de grandeur et le choix de cette dynamique d'échange ne nuisait pas aux performances du modèle en terme de temps de calcul. L'évolution des fonctionnalités du modèle dans sa version 1.0 a impliqué de représenter de manière beaucoup plus fine les transferts d'eau et de pesticides dans le sol. La résolution de ce processus étant beaucoup plus consommateur en temps de calcul, il a fallu mettre au point une dynamique temporelle des échanges adaptée.

Dans MHYDAS-Pesticides-1.0, les simulateurs requièrent et produisent leurs variables à des pas de temps fins (de l'ordre de la minute) sauf le simulateur WATSFAR. Celui-ci échange ses variables à des pas de temps fins pendant les périodes de crue et à un pas de temps plus grossier (de l'ordre de l'heure) entre les périodes de crue. Il n'y a pas de ruissellement sur ces périodes et les autres simulateurs reçoivent une valeur nulle de ruissellement sur les pas de temps fins intermédiaires entre deux pas de temps grossiers. Le calendrier de ces périodes est établi par un simulateur dédié au temps initial de la simulation. Cette approche permet de gagner par rapport au même modèle à pas de temps constant fin, un ratio allant entre 5 et 10 selon la fréquence des périodes de crue dans la chronique des précipitations.

## Annexe A : base de données des espèces d’adventices

Afin de déterminer la présence des espèces herbacées d’une sous-unité de surface est nécessaire une base de données d’ocurrence des espèces selon le type de sol (hydromorphe, acide ou autre) et la stratégie agronomique (travail du sol, désherbage chimique ou mixte) est requise. Toutes les combinaisons des stratégies agronomiques et des types de sol doivent être renseignées pour une espèce. Ces informations sont analysées par MHYDAS-Pesticides face à l’attribut spatial ‘SoilType’ de chaque unité de surface et l’évènement d’initialisation ‘soil\_management\_strategy’ de chaque sous-unité de surface.

TABLE 3 – Exemple de la base de données des espèces d’adventices *.sqlite*.

<b>PLANTNAME</b> (Nom de l’espèce)	<b>PRACTICE</b> (Stratégie agronomique)	<b>SOILTYPE</b> (Type de sol)	<b>PRESENCE</b> (Possibilité de présence)
Espèce X	Mechanical	Hydromorphic	0 ou 1
Espèce X	Mechanical	Acidic	0 ou 1
Espèce X	Mechanical	Other	0 ou 1
Espèce X	Mixed	Hydromorphic	0 ou 1
Espèce X	Mixed	Acidic	0 ou 1
Espèce X	Mixed	Other	0 ou 1
Espèce X	Chemical	Hydromorphic	0 ou 1
Espèce X	Chemical	Acidic	0 ou 1
Espèce X	Chemical	Other	0 ou 1
Espèce Y	Mechanical	Hydromorphic	0 ou 1
Espèce Y	Mechanical	Acidic	0 ou 1
Espèce Y	Mechanical	Other	0 ou 1
Espèce Y	Mixed	Hydromorphic	0 ou 1
Espèce Y	Mixed	Acidic	0 ou 1
Espèce Y	Mixed	Other	0 ou 1
Espèce Y	Chemical	Hydromorphic	0 ou 1
Espèce Y	Chemical	Acidic	0 ou 1
Espèce Y	Chemical	Other	0 ou 1

## Annexe B : valeurs de la régression logistique et seuils d'énergie cinétique de la pluie

TABLE 4 – Valeurs d'ajustement pour la régression logistique.

Coefficient	Description	Valeurs
$K_1$	Premier coefficient d'ajustement ou interception	-5.79902
$K_2$	Deuxième coefficient d'ajustement ou interception	-10.70733
$k1_{ston}$	Coefficient d'ajustement de la pierrosité pour calculer $C_1$	-0.13929
$k2_{ston}$	Coefficient d'ajustement de la pierrosité pour calculer $C_2$	1.48234
$k1_{rough}$	Coefficient d'ajustement de la rugosité pour calculer $C_1$	0.91945
$k2_{rough}$	Coefficient d'ajustement de la rugosité pour calculer $C_2$	-1.21045
$k_{E_k}$	Coefficient d'ajustement de l'énergie cinétique	0.24771

TABLE 5 – Valeurs des seuils d'énergie cinétique cumulée depuis le dernier travail du sol.

Classe de pierrosité $C_{ston}$	Classe de rugosité $C_{rough}$	Seuils d'énergie cinétique	
		$A$	$B$
1	1	411.9706446	1771.704474
1	2	274.0183623	2209.935399
1	3	164.8127034	2209.935399
2	1	441.3818626	2693.636988
2	2	293.5455142	1681.688871
2	3	179.6219133	2108.098151
3	1	503.0241552	847.7851306
3	2	316.2905744	1220.465404
3	3	195.3020225	1593.560093



## Annexe C : relation empirique de la fraction de couverture végétale pour différents types d'équipement

TABLE 6 – Types d'équipements, qualité de réglage et valeurs de référence expérimentales de la fraction de couverture végétale.

Type d'équipement	Classe	Qualité de réglage	Valeurs de référence expérimentales		
			Mai	Juin	Juillet
non renseigné	0	-	-	-	-
pneumatique simple (type Tecnomia pulsar)	1	bonne (1)	0.4	0.174	0.103
		mauvaise (0)	0.445	0.25	0.15
		moyenne(0.5)	0.4265	0.212	0.1225
pneumatique réglable en largeur (type Berthoud sprintair)	2	bonne (1)	0.36	0.25	0.13
		mauvaise (0)	0.4	0.4	0.37
		moyenne(0.5)	0.38	0.33	0.25
atomiseur jet porté, simple ou avec déflecteur (type Cabrol 600 arbo ou viti)	3	bonne (1)	0.25	0.25	0.15
		mauvaise (0)	0.4	0.4	0.4
		moyenne(0.5)	0.33	0.33	0.28
canon	4	bonne (1)	0.4	0.2	0.1
		mauvaise (0)	0.4	0.2	0.1
		moyenne(0.5)	0.4	0.2	0.1
lance ou pulvérisateur à dos	5	bonne (1)	0	0	0
		mauvaise (0)	0	0	0
		moyenne(0.5)	0	0	0
souffreuse	6	bonne (1)	0.4	0.2	0.1
		mauvaise (0)	0.4	0.25	0.15
		moyenne(0.5)	0.4	0.23	0.13

<sup>1</sup> fleuraison en juin

<sup>2</sup> fin de la formation de raisins en juillet

## Références

- Andrieux, P., Bailly, J.-S. et Voltz, M., 2021. An operational soil surface classification for predicting soil infiltration rates of Mediterranean agricultural soils. UMR LISAH, INRAE Montpellier. Working paper.
- Andrieux, P., Hatier, A., Asseline, J., Noni, G. de et 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 :
- Bailly, J.-S., Dagès, C., Combemale, D., Crevoisier, D., Dollinger, J. et Lanoix, M., 2015. Méthodologie de diagnostic et de gestion des réseaux de fossés agricoles infiltrants pour la limitation de la contamination des masses d'eau par les pesticides - Rapport d'étape, ONEMA. 2015. pp. 116.
- Chahinian, N., 2004. Paramétrisation multi-critère et multi-échelle d'un modèle hydrologique spatialisé de crue en milieu agricole. {PhD Thesis}. Montpellier : Université de Montpellier III.
- Crevoisier, D. et Voltz, M., 2013. WATSFAR : numerical simulation of soil WATER and Solute fluxes using a FAst and Robust method. In : Vol. 15, EGU2013-10296, EGU General Assembly 2013. Wien, Austria : 2013.
- Dollinger, J., Dagès, C., Negro, S., Bailly, J.-S. et Voltz, M., 2016. Variability of glyphosate and diuron sorption capacities of ditch beds determined using new indicator-based methods. Science of the Total Environment. 2016. Vol. 573. DOI 10.1016/j.scitotenv.2016.08.168.
- Fabre, J.-C., Louchart, X., Moussa, R., Dagès, C., Colin, F., Rabotin, M., Raclot, D, Lagacherie, P. et Voltz, M., 2010. OpenFLUID : A Software Environment for Modelling Fluxes in Landscapes. LANDMOD2010. 2010. pp. 13.
- Lagacherie, P., Rabotin, M., Colin, F., Moussa, R. et Voltz, M., 2010. Geo-MHYDAS : A Landscape Discretization Tool for Distributed Hydrological Modeling of Cultivated Areas. Computers & Geosciences. août 2010. Vol. 36, n° 8, pp. 1021-1032. DOI 10.1016/j.cageo.2009.12.005.
- Lalauze, S., Pare, N. et Louchart, X., 2012. Weeds Germination Using Hydrothermal Time Model. Document interne, UMR LISAH, INRAE Montpellier.
- Louchart, X., 2011. Application of Organic Pollutant on Soil and Vegetation with LAI and Beer-Lambert Partition. Document interne, UMR LISAH, INRAE Montpellier.
- Louchart, X., Fabre, J.-C., Chataigner, M., Crevoisier, D., Libres, A. et Roman, S., 2012. Growth of Plant Canopy by Computing LAI on SU Units. Document interne, UMR LISAH, INRAE Montpellier.
- Moussa, R., 1996. Analytical Hayami Solution for the Diffusive Wave Flood Routing Problem with Lateral Inflow. Hydrological Processes. 1996. Vol. 10, n° 9, pp. 1209-1227. DOI 10.1002/(SICI)1099-1085(199609)10:9<1209::AID-HYP380>3.0.CO ;2-2.
- Moussa, R., Fabre, J.-C., Lalauze, S. et Louchart, X., 2011. Water Transfer on Surface Units Using Hayami Propagation Method. Document interne, UMR LISAH, INRAE Montpellier.

Moussa, R., Voltz, M. et Andrieux, P., 2002. Effects of the Spatial Organization of Agricultural Management on the Hydrological Behaviour of a Farmed Catchment during Flood Events. *Hydrological Processes*. février 2002. Vol. 16, n° 2, pp. 393-412. DOI 10.1002/hyp.333.

Pare, N., 2011. Pollution de l'eau par les pesticides en milieu viticole languedocien. Construction d'un modèle couplé pression-impact pour l'expérimentation virtuelle de pratiques culturales à l'échelle de petits bassins versants. {PhD Thesis}. Montpellier : Institut National d'Etudes Supérieures Agronomiques de Montpellier.

Schaap, M. G. et Genuchten, M.Th. van, 2005. A Modified Mualem-van Genuchten Formulation for Improved Description of the Hydraulic Conductivity Near Saturation. *Vadose Zone Journal*. 2005. Vol. 5, pp. 27-34.

Šimůnek, J., Šejna, M., Saito, H., Sakai, M. et van Genuchten, M. Th., 2013. The Hydrus-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 4.17, HYDRUS Software Series 3. Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA, pp. 342.

Van Keulen, H., 1975. Simulation of water use and herbage growth in arid regions. Pudoc, Wageningen.

Walker, Allan, 1974. A simulation model for prediction of herbicide persistence. Wiley Online Library.

Willis, G. H., McDowell, L. L., Smith, S. et Southwick, L. M., 1994. Permethrin and sulprofos washoff from cotton plants as a function of time between application and initial rainfall. *Journal of Environmental Quality*. 1994. Vol. 23, pp. 96-100.



LR 0014594 / 2017-007745-01  
AAP READYNOV 2017  
POLLDIFF CAPTAGE INRA  
AP01 Investir durablement dans la croissance intelligente

*WP3 : Développement de méthodes d'évaluation des risques agro-environnementaux : pressions, états, impacts.*

*Livrables du LISAH*

**INRAE**  
**LISAH**