



HAL
open science

Étude de l'influence de la variabilité spatiale des sols sur le fonctionnement modélisé d'une zone tampon enherbée

Laura Gatel

► **To cite this version:**

Laura Gatel. Étude de l'influence de la variabilité spatiale des sols sur le fonctionnement modélisé d'une zone tampon enherbée. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2014. dumas-01583266

HAL Id: dumas-01583266

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01583266>

Submitted on 5 Jan 2022

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.



RAPPORT DE STAGE

présenté par

Laura Gatel

Diplôme d'ingénieur de l'ENGEES
(Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg)
Master 2 ISIE (ingénierie et géosciences pour l'environnement), Université de Strasbourg.

Étude de l'influence de la variabilité spatiale des sols sur le fonctionnement modélisé d'une zone tampon enherbée

IRSTEA LYON-VILLEURBANNE

Encadrante : Claire Lauvernet
Co-encadrant : Claudio Paniconi (INRS)

Date de soutenance : **4 septembre 2014**

REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier Claire pour sa disponibilité, son aide et sa bonne humeur. J'espère que ce stage n'était que le début de notre collaboration !.

Merci à Claudio Paniconi pour le temps passé au téléphone France-Québec, le regard qu'il a porté sur mon travail et ses conseils avisés.

Merci à toute l'équipe polldiff pour la bonne ambiance au quotidien et pour la rapidité avec laquelle elle intègre les nouveaux venus !

Une petite pensée enfin pour tous les habitués du premier étage, leur sens développé de la cuisine et du ravitaillement de 9h30.

RÉSUMÉ

L'objectif de cette étude est d'étudier l'influence de la variabilité spatiale des caractères hydrodynamiques des sols sur les écoulements d'eau en surface et subsurface à l'échelle d'une bande enherbée. L'étude s'appuie sur la conductivité hydraulique en raison de sa forte variabilité spatiale et de sa grande influence sur la répartition des flux dans le sol. CATHY (CAthment HYdrology) est un modèle de recherche à base physique capable de simuler de façon couplée les écoulements de surface et subsurface. Les travaux se déroulent en collaboration avec Claudio Paniconi, chercheur à l'INRS-ETE et développeur du modèle CATHY.

Après avoir testé la sensibilité du modèle à certains de ses paramètres d'entrée, aux conditions aux limites et au raffinage du maillage, les travaux se sont concentrés sur la conductivité hydraulique à saturation. L'étude a été menée d'une part sur un domaine avec une conductivité uniforme ou uniforme par horizon en comparaison avec les données terrain le site de Saint-Joseph (bassin versant de la Morcille, beaujolais) et d'autre part avec des champs hétérogènes générés à l'aide d'un outil statistique (loi gaussienne et lognormale). Les simulations avec une conductivité uniforme ne permettent pas de reproduire le ruissellement observé par manque de précision dans la représentation physique du terrain. Les simulations basées sur des champs de conductivité hydraulique hétérogènes donnent des résultats assez uniformes sur le ruissellement mais la circulation en subsurface est très hétérogène selon l'auto-corrélation ou non de la conductivité : avec corrélation, les flux latéraux sont privilégiés par rapport aux flux verticaux, l'eau atteint rarement la nappe.

ABSTRACT

The objective of this thesis is to study the influence of soil hydrodynamic characteristics variability on surface and subsurface flow at a buffer strip scale. The study is based on the hydraulic conductivity because of its large spatial variability and its important influence on flow pathways. Cathy (CAthment HYdrology) is a research physically based model able to simulate coupled surface/subsurface flow. The work is in collaboration with Claudio Paniconi, researcher from INRS-ETE (Québec) and developer of Cathy. After testing the model sensitivity to some input variables, to the boundary conditions and to the mesh definition, the work focuses on hydraulic conductivity. The study was conducted on one hand with uniform (or uniform by horizons) conductivity domains compared with datasets from the Saint-Joseph site (Morcille catchment, Beaujolais, France) and on the other hand with heterogeneous fields generated by a statistical tool (Gauss and lognormal distribution). The simulations with uniform domains don't reproduce the observed runoff. The simulations based on heterogeneous conductivity fields produce quite uniform results concerning run-off but the subsurface circulation is very heterogeneous depending on the presence of K values correlation or not : with correlation, lateral flow outweighs vertical flow and the water rarely reaches the ground water.

INTRODUCTION

Les enjeux liés à l'agriculture sont des problématiques majeures de ce siècle. Le système de culture intensif est majoritaire en France et nécessite l'utilisation de produits chimiques pour assurer une production maximale tous les ans. Leurs fonctions sont très nombreuses : protection contre les maladies, les insectes, les plantes indésirables ou protection des produits pendant l'entreposage d'après récolte,... . En 2012, la France était le troisième plus gros consommateur mondial de pesticides derrière les Etats-Unis et le Japon. En Europe leur utilisation est réglementée. Chaque produit en vente sur le marché dispose d'une autorisation de mise sur le marché qui garantit "un risque acceptable" pour le consommateur et pour l'environnement sous réserve du respect des conditions d'utilisation.

Des substances phytosanitaires sont retrouvées dans les eaux de surface et altèrent la faune et la flore sauvages, dégradent les sites de production d'eau potable. Le phénomène est plus ou moins prononcé en fonction des régions (en fait du contexte agronomique, pédologique et climatique). L'adoption de la directive cadre sur l'eau (DCE) à l'échelle européenne à partir de l'année 2000 a permis de mettre en place un diagnostic à grande échelle de l'état des eaux. Dans ce contexte, Irstea (Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture) et plus précisément l'équipe pollution agricole diffuse de Lyon-Villeurbanne joue un rôle majeur dans l'étude des phénomènes de transfert de polluant et dans la mise en place de méthodes pour évaluer les risques et les réduire.

L'aménagement de zones tampons est une des mesures qui contribue à parvenir à l'objectif fixé par la DCE : bon état des masses d'eau en 2015. Les zones tampon végétalisées sont des zones tampons sèches placées à proximité des champs cultivés ou des cours d'eau. Leur efficacité dépend de leur dimensionnement, de leur position mais aussi du contexte local (type de sol sur lequel elles sont placées, culture avoisinante, présence de nappe, type de climat...). Au sein de l'équipe Polldiff d'Irstea, des études de terrain ont été menées pour approfondir la compréhension du fonctionnement des zones tampons enherbées. Il existe des modèles qui permettent de détailler la représentation des flux d'eau en surface et subsurface en se basant sur ces données terrain. Les écoulements dans le sol et l'interaction surface-subsurface sont fortement influencés par les caractéristiques hydrodynamiques du sol et notamment par la conductivité hydraulique. Celle-ci se distingue aussi par sa très grande variabilité spatiale : il est difficile d'extrapoler sa valeur à tout un volume à partir de mesures ponctuelles. Dans quelle mesure l'absence de connaissance précise de la distribution de la conductivité hydraulique est-elle une barrière dans la compréhension des écoulements d'eau dans le sol au niveau des bandes enherbées ? Le modèle sur lequel on s'appuiera pour répondre à cette question est un modèle de recherche à base physique capable de simuler de façon couplée les écoulements de surface et subsurface : CATHY (CAthment HYdrology). Le but du stage est d'étudier l'influence de l'hétérogénéité spatiale du sol sur le fonctionnement des bandes enherbées et de déterminer s'il serait possible d'utiliser des caractéristiques hydrodynamiques moyennes à l'échelle de la zone tampon, dans un contexte de modélisation numérique.

Il est d'abord essentiel d'établir une synthèse bibliographique sur les sujets concernés : les modalités de fonctionnement des bandes enherbées, les outils de modélisation existants et la gestion de l'hétérogénéité spatiale dans ces modèles. Les données terrain et le modèle CATHY seront ensuite détaillés et la méthode mise en place expliquée, avant de passer aux résultats et à leur discussion.

Sommaire

1	Contexte, objectifs et état de l'art	9
1.1	L'IRSTEA	9
1.1.1	Historique de l'institut	9
1.1.2	Le statut actuel d'IRSTEA	9
1.1.3	L'équipe Polutions agricoles diffuses à Lyon-Villeurbanne	9
1.2	Objectifs et contexte	9
1.2.1	Objectifs de l'étude	9
1.2.2	Les pesticides au sein des zones tampon enherbées	10
1.2.3	Les outils de modélisation hydrologique existants	12
1.2.4	Gestion de l'hétérogénéité du sol dans les modèles	12
2	Matériel et méthodes	14
2.1	Les données de terrain	14
2.1.1	Le site expérimental de la Morcille	14
2.1.2	Les travaux de Jean-Guillaume Lacas	15
2.1.3	Les travaux d'Arnaud Boivin	15
2.1.4	Les propriétés de la bande enherbée de Saint-Joseph	17
2.2	Le modèle CATHY	17
2.2.1	Caractéristiques principales du modèle	18
2.2.2	Description du modèle CATHY 3D	18
2.2.3	La simulation	20
2.3	L'outil de génération de champs statistiques	21
2.4	Méthode	21
2.4.1	Prise en main du modèle	21
2.4.2	Test du modèle	21
3	Résultats	23
3.1	Sensibilité du modèle à certains paramètres	23
3.1.1	Sansibilité au raffinage du maillage	23
3.1.2	Tests sur les conditions aux limites	24
3.1.3	Rugosité de la surface du sol	26
3.1.4	La conductivité hydraulique à saturation	27
3.1.5	Synthèse sur la sensibilité du modèle	29
3.2	Etude de l'influence de la variabilité spatiale	29
3.2.1	Les champs statistiques générés	29
3.2.2	Détail de simulations	30
3.2.3	Résultats des simulations basées sur les champs générés avec la loi lognormale	31
3.2.4	Résultats de la simulation basée sur les champs générés avec la loi de gauss	33
4	Conclusions et perspectives	34
4.1	Synthèse	34
4.2	Perspectives à court terme	34
4.3	Perspectives à long terme	34
A	Organigramme du centre IRSTEA de Lyon villeurbanne	37
B	Courbes de rétention et conductivité hydraulique	38
C	Distribution des champs aléatoires générés	39

Liste des figures

1.1	Schéma illustrant les voies de transport principales des pesticides après leur épandage . . .	10
1.2	Schéma fonctionnel d'une bande enherbée [Lacas, 2005]	11
2.1	Localisation du bassin versant de l'Ardière [Druguet, 2012]	14
2.2	Localisation du bassin versant de la Morcille [Druguet, 2012]	15
2.3	Photos du versant avec la parcelle de vigne et la zone enherbée et position de la placette instrumentée [Boivin, 2007]	16
2.4	Schéma de la bande enherbée de Saint-Joseph en 2006 lors des expériences de Boivin . . .	16
2.5	Schéma des mesures terrain de porosité et de conductivité hydrauliques en profondeur de Lacas (à gauche) à partir desquels la découpe des horizons de l'étude a été définie (à droite).	17
2.6	Schéma des conditions limites amont et aval qui représentent au mieux les conditions d'expérimentation	22
2.7	Profondeur de la nappe à l'état initial associée aux mesures piézométriques pour chaque événement avec interpolation linéaire des points de mesure	22
3.1	Comparaison des volumes sortants du terrain selon le raffinement du maillage après une simulation de 7 jours	24
3.2	Photo de la limite aval de la bande enherbée avec la Morcille (15 avril 2014)	25
3.3	Volume cumulé sortant pour quatre hauteurs de seepage face (SPF) différentes pour une simulation de 7 jours	25
3.4	Graphique représentant la fraction du nombre total de noeuds en situation de ruissellement Dunne ou Horton dans deux cas de conditions amont : condition de Neumann ou condition de Dirichlet (pour les deux : avec une bande imperméable sur les 50 premiers centimètres du domaine)	26
3.5	Représentation 3D de la pression sur le domaine à $t=3600$ s de la simulation avec un Strickler à 6	27
3.6	Évolution de la fraction de noeuds en ruissellement de type Dunne dans le temps au cours de trois simulations avec des coefficients de Strickler différents	27
3.7	Comparaison des volumes sortants du terrain selon la conductivité hydraulique du sol après une simulation de 24 h	28
3.8	Comparaison de l'évolution de la fraction des noeuds en ruissellement selon la conductivité hydraulique du sol après une simulation de 24 h	28
3.9	Trois exemples d'association de champs hétérogènes de conductivité hydraulique (Ces champs correspondent au cas 3 : avec le conditionnement et une longueur de corrélation de 8 m)	31
3.10	Graphiques représentant les résultats de 6 simulations par chacun des 4 cas. A gauche, le ruissellement (% de maille en ruissellement au cours des 6 premières heures de la simulation) et à droite la capacité de rétention de la bande enherbée en pourcentage (voir équation 3.1)	32
3.11	Boîtes à moustaches (médiane (trait épais), quartile 0.25 au quartile 0.75, moustaches jusqu'à la valeur distante d'au maximum 1.5 fois la distance interquartile, points extrêmes (ronds)) comparant les résultats obtenus pour chacun des cas concernant le ruissellement et la capacité de rétention après 24h de simulation (pour le cas 4, 11 simulations sont prises en compte contre 6 pour les autres cas)	32
3.12	Bilan de la simulation avec des champs générés par la loi de Gauss en terme de mouvement de la nappe en subsurface (voir explications plus détaillées au paragraphe précédent), ruissellement et capacité de rétention du sol.	33
A.1	Organigramme du centre IRSTEA de Lyon villeurbaine	37
B.1	Courbes de rétention et conductivité hydraulique des trois horizons du sol de la Morcille .	38

C.1	Distribution des valeurs de conductivité hydraulique dans les champs générés aléatoirement (loi de Gauss dans le cas 0 et loi ognormale dans les autres cas)	39
D.1	Exemple de deux champs générés aléatoirement avec les points de conditionnement appliqués (à gauche l'horizon 1 et à droite l'horizon 2)	40

Liste des tableaux

1.1	Tableau comparatif de quatre modèles très utilisés	12
2.1	Tableau récapitulatif des propriétés hydrodynamiques du sol de la parcelle de Saint-Joseph [Lacas, 2005] intégrées dans CATHY	17
3.1	Tableau récapitulatif des simulations de tests du modèle à la sensibilité de divers paramètres	23
3.2	Description des quatre niveaux de complexité testés	23
3.3	Tableau présentant les temps CPU (Central Processing Unit) pour chaque simulation . . .	24
3.4	Comparaison des volumes sortants du terrain selon la profondeur de la seepage face (SPF) en aval après une simulation de 7 jours	25
3.5	Tableau des moyennes géométriques et écarts-type des conductivités hydrauliques mesurées par Lacas	29
3.6	Caractéristiques des 5 cas de simulation avec des conductivités hétérogènes	30
3.7	Taux de convergences des simulations selon les cas	30
3.8	Nombre de simulations pour lesquelles la hauteur de la nappe a été influencée par l'injection d'eau en surface en fonction de la distance par rapport à x (point d'injection) vers l'aval sur lesquels on observe une remontée de la nappe	33
D.1	Récapitulatif des valeurs de conditionnement sur les deux premiers horizons	40

Partie 1

Contexte, objectifs et état de l’art

1.1 L’IRSTEA

1.1.1 Historique de l’institut

Le CEMAGREF (CEntre nationale du Machinisme Agricole, du Génie Rural et des Eaux et Forêts) a été fondé en 1981 pour répondre à des enjeux tels que la modernisation de l’équipement des campagnes et de la production agricole. Ces problématiques ont peu à peu laissés place à des questions de gestion des ressources en eau, de maîtrise des pollutions ou de gestion des risques naturels. À l’occasion de ses 30 ans, l’institut a changé de nom devenant Irstea pour mieux affirmer ses nouvelles missions : l’Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l’Environnement et l’Agriculture.

1.1.2 Le statut actuel d’IRSTEA

Irstea est un établissement public scientifique et technologique au même titre que le CNRS, l’INRA ou l’IRD par exemple. Il se situe sous la tutelle des ministères chargés de la recherche et de l’agriculture.

L’institut travaille en partenariat avec le domaine public (les agences de l’eau, l’ONEMA, ...) mais aussi avec le domaine privé (EDF, Suez environnement, Veolia). Les appels d’offres auxquels Irstea répond lui permettent d’assurer un financement propre à hauteur de 32%.

Au sein de ses 9 centres en France, Irstea emploie 1750 agents, dont 700 ingénieurs et chercheurs, 250 doctorants et 40 post-doctorants.

1.1.3 L’équipe Polutions agricoles diffuses à Lyon-Villeurbanne

Irstea est divisé en 19 unités de recherche. Les locaux de Lyon-Villeurbanne accueillent l’unité HHLY (hydrologie hydraulique de Lyon) et l’unité MAEP (milieux aquatiques, écologie et pollutions) dont l’équipe Pollutions Agricoles Diffuses fait partie.

Outre les unités de recherche, de grands thèmes transversaux ont été définis dans le but d’augmenter la collaboration des équipes entre les grands centres. L’équipe Polldiff de Lyon-Villeurbanne fait partie du thème de recherche ARCEAU (aléas et risques liés au cycle de l’eau) avec des équipes des centres d’Aix-en-Provence et Antony.

L’équipe Polldiff dirigée par Nadia Carluer (annexe A.1) est actuellement composée de quatre permanents dont une assistante ingénieur, trois agents en CDD, trois doctorants et un étudiant en alternance. Dans la première moitié de cette année, l’effectif a été renforcé avec deux stagiaires de l’ENGEES et un chercheur de l’INRS-ETE (Québec) en congé sabbatique. L’équipe Polldiff est à l’interface entre les services travaillant sur la qualité de l’eau de MAEP et les équipes d’hydrologie des bassins versants (unité HHLY Hydrologie Hydraulique).

1.2 Objectifs et contexte

1.2.1 Objectifs de l’étude

La problématique abordée dans cette étude fait suite à des observations et des questionnements qui ont émergés à la fin de la thèse de Jean-Guillaume Lacas en 2005 [Lacas, 2005]. Sa thèse était basée sur une expérimentation de zone tampon enherbée dans le bassin versant de la Morcille (beaujolais, voir paragraphe 2.1.1). L’étude portait en partie sur les écoulements de l’eau ruissellante provenant de la parcelle de vigne en amont de la zone enherbée. La comparaison des données terrain qu’il a recueillies

avec la modélisation (sur le modèle à base physique HYDRUS 2D) de la zone a mis en évidence une sous-estimation des flux infiltrés dans le modèle. S'agit-il d'une conséquence de l'anisotropie de la conductivité ou d'un manque de prise en compte des macropores ?

Cette étude ne va se consacrer qu'au transfert de l'eau dans une bande enherbée, en considérant que le transfert des pesticides y est fortement lié. Le transport des solutés et des sédiments n'est pas pris en compte mais on peut considérer que l'étude se penche de ce fait sur le cas le plus critique : celui des pesticides les plus solubles. En effet, les pesticides les moins solubles s'adsorbent plus facilement sur les particules de sol, se dégradent plus rapidement et ont moins de risque de rejoindre le réseau hydrographique.

Pour mieux représenter et comprendre les flux d'eau en subsurface, on se basera sur un modèle 3D avec les objectifs suivants :

- Prendre en main le modèle et explorer ses capacités à rendre compte de la réalité sur une représentation simplifiée de la bande enherbée de la Morcille: types de conditions limites, sensibilité à différents paramètres, ...
- Varier l'hétérogénéité du sol (homogène, stratifié, hétérogène) en particulier pour décrire la conductivité hydraulique et analyser les différentes réponses du sol
- Comparer ces réponses aux données terrain et comprendre à quel point il est possible de simplifier l'hétérogénéité du sol sans altérer le comportement du modèle.

1.2.2 Les pesticides au sein des zones tampon enherbées

Généralités

Que deviennent les produits phytosanitaires après leur épandage ? Le terme produit phytosanitaire désigne ici l'ensemble des substances visant à la protection de cultures contre les nuisibles (animaux ou végétaux). Ils tiennent des rôles très variés en fonction de la substance : combattre les ravageurs, réguler la croissance des plantes, protéger les produits contre la détérioration pendant l'entreposage et le transport, ...

On retrouve dans certains cours d'eau ou écosystèmes naturels des concentrations supérieures aux normes en produits phytosanitaires. Par quels chemins ces molécules transitent-elles ? De manière plus générale, que deviennent-elles après leur épandage ?

Chaque produit réagit au contact de l'environnement en fonction de ses caractéristiques chimiques et du sol : adsorption sur les particules de sol, dissolution dans l'eau, dégradation... En surface les produits dissous peuvent être transportés vers l'aval par ruissellement et si celui-ci est assez conséquent pour mettre en mouvement des particules sédimentaires, il entraîne aussi les produits adsorbés aux particules fines du sol (voir figure 1.1). Le transport des molécules dissoutes qui s'infiltrent en subsurface dépend beaucoup de l'état du sol (état hydrique, existence de chemin préférentiels, ...).

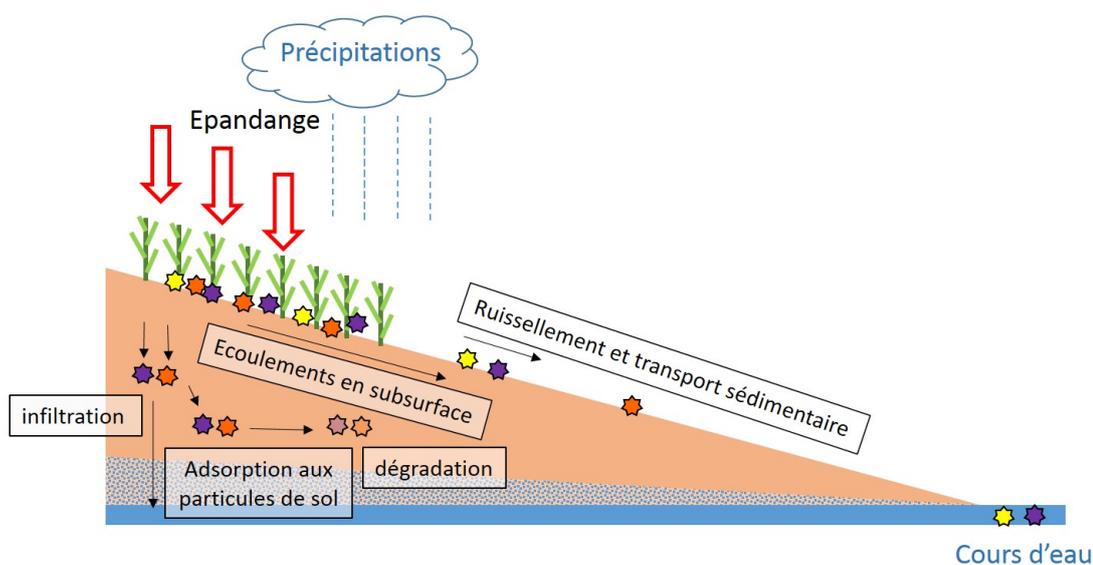


Figure 1.1: Schéma illustrant les voies de transport principales des pesticides après leur épandage

Des substances parfois difficiles à détecter Les techniques de détection et les analyses d'eau contaminée sont de plus en plus performantes mais ces progrès se heurtent à des molécules plus difficiles à détecter car plus actives à moindre concentration. De plus, les effets de l'accumulation de plusieurs types de molécules dans un écosystème à long terme sont très mal connus.

Fonctionnement global des zones tampon végétalisées L'objectif des zones tampons est de réduire le transfert des pesticides vers des zones à protéger. On distingue deux types de zones tampons : les zones sèches (haie, zone boisée, bande enherbée, fascine) et les zones humides (roselière, mare, fossé végétalisé). Dans tous les cas, ces zones sont installées en bordure de parcelle cultivée ou de cours d'eau.

Dans le cadre de mon stage, je me suis intéressée exclusivement à un type de zone tampon : les bandes enherbées. Historiquement, les bandes enherbées ont commencé à être mises en place pour lutter contre l'érosion et la dérive des phytosanitaires hors des limites de la parcelle lors de l'épandage. Aujourd'hui, leur efficacité est reconnue pour d'autres processus (voir figure 1.2) :

- infiltration du ruissellement provenant de la parcelle cultivée : c'est le processus majoritaire. L'infiltration est favorisée par la présence de racines. En fonction de la composition des horizons du sol plus profonds, l'eau peut rejoindre rapidement la nappe (scénario défavorable) ou se purifier dans le sol grâce à des phénomènes d'adsorption et de dégradation des pesticides.
- retenue des sédiments issus de l'érosion de la parcelle. La zone enherbée réduit la vitesse d'écoulement du ruissellement et permet la sédimentation d'une partie de ces particules.
- adsorption des molécules aux particules de sol.
- dégradation des pesticides. Le premier horizon d'une bande enherbée est riche en matière organique, ce qui le rend particulièrement propre à dégrader des pesticides.

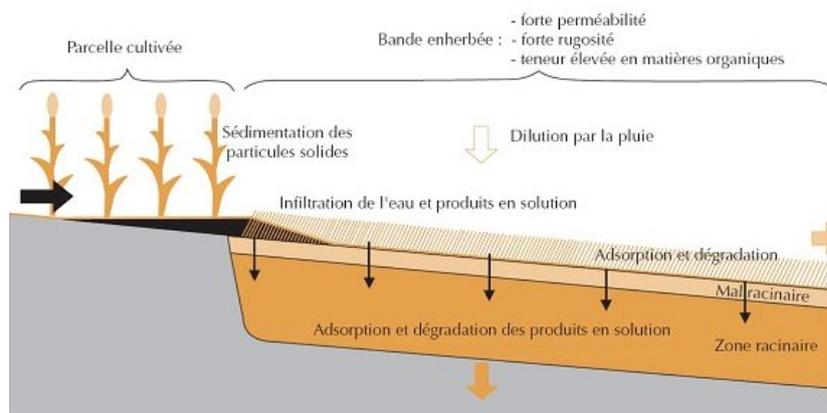


Figure 1.2: Schéma fonctionnel d'une bande enherbée [Lacas, 2005]

La position et le dimensionnement des bandes enherbées sont deux paramètres sur lesquels il est relativement simple de jouer et qui conditionnent leur bon fonctionnement. Depuis 2005, la mise en place de SCE (Surface en Couvert Environnemental) est obligatoire pour les exploitations qui percevaient les aides de la PAC (Politique Agricole Commune). Les conditions de mise en place et le dimensionnement de ces zones peuvent suivre les recommandations du CORPEN [COR,] (Comité d'ORientation pour des Pratiques agricoles respectueuses de l'ENvironnement) sous tutelle du ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie mais elles sont généralement limitées au minimum obligatoire.

Une zone tampon enherbée placée et dimensionnée correctement peut être très efficace et peut retenir entre 80% et 100% des produits phytosanitaires [A,].

Facteurs d'influence de l'efficacité des zones enherbées

L'efficacité de la bande peut varier selon de nombreux facteurs : composition du sol, climat, type de végétation, pratiques agricoles, types de produits phytosanitaires, ...

Les propriétés directement relatives à la capacité d'infiltration du sol (seul processus étudié par la suite) sont la conductivité hydraulique à saturation et la rétention. La mesure de ces caractéristiques sur le terrain est relativement lourde à mettre en place et elle est entachée d'incertitude. De plus, l'hétérogénéité est souvent telle qu'il devient difficile d'extrapoler les données d'un point de mesure à une zone entière [Lacas, 2005].

Les données concernant la hauteur de la nappe sont également importantes, car une fois que le sol de la bande enherbée est saturé (ce qui peut arriver par remontée de nappe), sa capacité d'infiltration s'en trouve très réduite.

1.2.3 Les outils de modélisation hydrologique existants

Les modèles à base physique permettent d'analyser en détail les écoulements d'eau et les processus, on se concentrera donc sur ceux-ci dans ce stage.

Quelle que soit l'échelle du modèle, les données d'entrée d'un modèle spatialisé à base physique sont : la topographie du site (modèle numérique de terrain), la géométrie du domaine (nombre de mailles, épaisseur des couches, ...), les propriétés physiques du sol (conductivité, porosité), les conditions initiales et les conditions aux limites ; et les données de sortie pour chaque nœud sont typiquement la vitesse de l'écoulement, le flux, la pression et la teneur en eau.

De nombreux modèles à base physique ont été développés pour tenter de modéliser les écoulements de l'eau en surface et en subsurface. Ces modèles se prêtent bien à l'étude des zones enherbées et permettent de quantifier son mode de fonctionnement. Dans la littérature, on peut référencer quatre d'entre eux : PARFLOW [Kollet, 2006], CATHY [Camporese et al., 2010], VFSSMOD [Munoz-Carpena et al., 1999] et HYDRUS-3D [Simunek et al., 1999] (voir tableau 1.1) .

	HYDRUS 2D	PARFLOW	CATHY 3D	VFSSMOD
Écoulement de surface	non	2D onde cinématique	3D onde de diffusion	2D onde cinématique
Écoulement de subsurface	Richards	Richards 3D	Richards 3D	Green-Ampt 2D
Transport des sédiments	non	non	oui	oui
Transport des substances dissoutes	oui	oui	non	oui
type de simulation	continu	continu	continu	événementiel

Note : Le "type de simulation" fait référence au mode "continu" qui permet une simulation de plusieurs événements à la suite ou "événementiel" qui n'en traite qu'un à la fois.

Tableau 1.1: Tableau comparatif de quatre modèles très utilisés

On détaillera par la suite (paragraphe 2.2.1) la démarche de choix du modèle CATHY et son intérêt par rapport aux autres modèle pour la présente étude.

1.2.4 Gestion de l'hétérogénéité du sol dans les modèles

Hétérogénéité du sol et techniques de mesure

L'écoulement de l'eau dans le sol est principalement fonction de quatre paramètres : la pression de l'eau dans le sol, la teneur en eau, la rétention et la conductivité hydraulique [Carluer, 1998]. Les courbes de rétention et de conductivité hydrauliques permettent de relier ces paramètres.

- Pression : dans le milieu saturé, la pression est positive et mesurée à l'aide d'un piézomètre. Pour un système statique, la pression croît linéairement avec la profondeur. Dans un milieu insaturé, la pression est négative et on utilise un tensiomètre pour mesurer la succion.
- Teneur en eau : en laboratoire, la méthode de mesure de la teneur en eau consiste à comparer le poids d'un échantillon avant et après séchage à l'étuve. Cette méthode nécessite du temps et implique la destruction de l'échantillon (si on veut avoir accès aux pores fermés). Sur le terrain, on utilise les différences de densité ou de résistivité des constituants du sol et de l'eau.
- Conductivité : elle est fonction de la perméabilité intrinsèque du sol (aptitude du sol à se laisser traverser par l'eau sous l'effet d'un gradient de pression). Elle peut être mesurée sur le terrain par un perméamètre de Guelph et un infiltromètre multidisque à succion contrôlée (TRIMS) qui estiment des conductivités non saturées ou un infiltromètre à double anneau de Müntz.

Comment modéliser l'hétérogénéité ?

Dans la littérature qui concerne les modèles de simulation d'écoulement en surface et subsurface, il est souvent rapporté que la perméabilité du sol est une des variables qui influence le plus les résultats [Li et al., 2005], [Zhu and Zhang, 2013], [Herbst et al., 2006].

La grande variabilité spatiale observée sur le terrain pour ce paramètre pose un problème : comment affecter une valeur correcte de perméabilité à chaque maille du domaine modélisé ? Si le nombre de mailles, la complexité du modèle ou simplement le manque de données terrain ne permettent pas de mettre en place une paramétrisation par méthode inverse, de nombreuses autres méthodes sont envisageables : extrapolation en fonction des observations visuelles sur le terrain, distributions aléatoires, simplification du modèle (jusqu'à simuler un domaine homogène parfois selon l'échelle de la représentation),...

A cette problématique de variabilité spatiale s'ajoute la non-additivité de la perméabilité : on ne peut pas passer de plusieurs valeurs ponctuelles de perméabilités à une valeur de perméabilité à l'échelle d'un volume en faisant une simple moyenne arithmétique [Renard and de Marsily, 1997].

Il existe des inégalités plus ou moins complexes qui encadrent de manière théorique la perméabilité équivalente [Renard and de Marsily, 1997]. La plus basique d'entre elles est l'inégalité fondamentale (voir équation (1.1)).

$$\mu_h \leq K \leq \mu_a \quad (1.1)$$

Avec μ_h la moyenne harmonique et μ_a la moyenne arithmétique de la conductivité hydraulique K sur un domaine donné.

Dans la littérature, il est souvent rapporté ([Kosugia and Ken'ichirou, 1996] et [Dagan et al., 1979]) que la loi lognormale est la loi qui permet le mieux de représenter une distribution de la conductivité hydraulique conforme au terrain.

Dans cette étude, on se propose de tester la représentation de l'hétérogénéité du sol par une distribution gaussienne et une loi lognormale.

Partie 2

Matériel et méthodes

2.1 Les données de terrain

2.1.1 Le site expérimental de la Morcille

Localisation

Le bande enherbée étudiée se situe dans le beaujolais sur la bassin versant de la Morcille dans le département du Rhône à une centaine de kilomètres au nord de Lyon (figures 2.1 et 2.2). C'est un terrain d'expérimentation important pour Irstea qui est instrumenté depuis une vingtaine d'années. Depuis, une grande quantité de données a été mesurée sur ce site, ce qui en fait une zone privilégiée pour la modélisation.

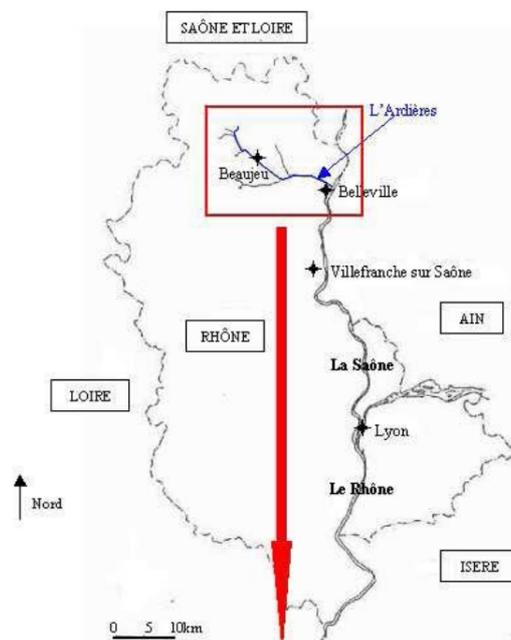


Figure 2.1: Localisation du bassin versant de l'Ardière [Druguet, 2012]

Contexte géographique et pédologique

La Morcille est un petit cours d'eau d'une dizaine de kilomètres de long. Son débit moyen en hiver atteint 100 L/s et en été il peut descendre sous les 10L/s (débit d'étiage à 3 L/s). Il se jette dans l'Ardière, un affluent de la Saône qui se jette elle-même dans le Rhône.

La paysage beaujolais est composé d'un ensemble de petites collines sur lesquelles la viticulture est majoritaire. A l'image de la région, le bassin versant de la Morcille est occupé à 70% de vignes. Les versants des collines sont assez pentus : 8% de pente en moyenne et jusqu'à 35% à certains endroits.

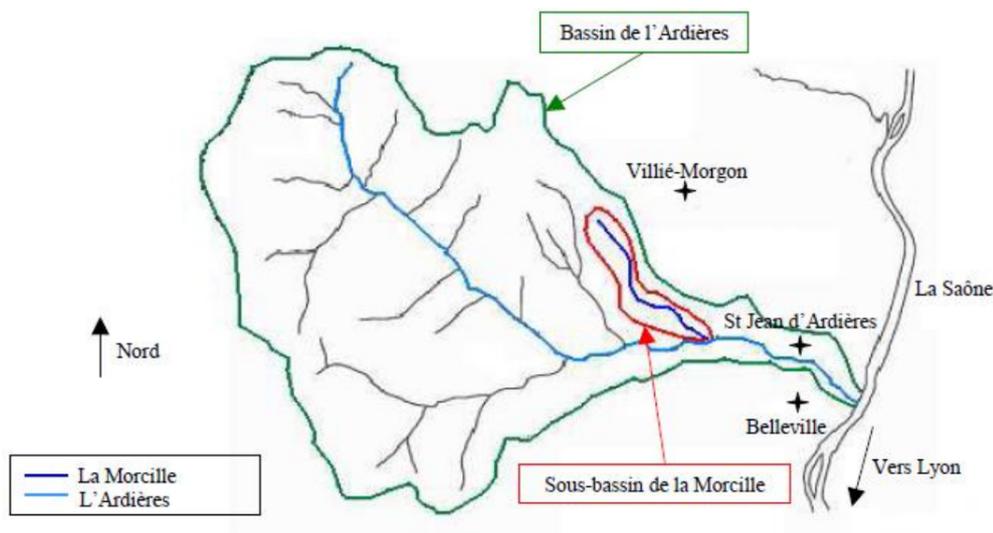


Figure 2.2: Localisation du bassin versant de la Morcille [Druguet, 2012]

Le bassin de la Morcille repose sur un socle granitique imperméable peu profond qui peut générer une nappe perchée saisonnière et favoriser des écoulements de subsurface [VandenBogaert, 2011]. Le sol du versant de la bande enherbée est relativement homogène (sauf les cinq premiers centimètres qui correspondent au mat racinaire) et sa texture est celle d'un sable limoneux.

Le site instrumenté se situe sur la propriété de M. Ducroux qui a accepté que Irstea travaille sur une partie de la zone enherbée à l'aval d'une de ses parcelles de vigne. Une vingtaine de mètres enherbés séparent le bas de la parcelle de vigne et la Morcille. La placette instrumentée mesure 6 m (dans le sens de la pente) de long pour 4 m de large avec une pente de 25% à 30%.

Ainsi, sur ce versant, les rangs de vignes ne sont pas enherbés, le sol est sableux et la pente forte (25%) : c'est donc un terrain sensible au ruissellement et à l'érosion. Pour limiter ce deuxième phénomène, des rases ont été aménagés en travers de pente tous les 20 m environ.

2.1.2 Les travaux de Jean-Guillaume Lacas

C'est avec la thèse de Jean-Guillaume Lacas que la parcelle a commencé à être instrumentée.

Il a placé un système de récupération des eaux ruissellantes du champs en amont de la bande enherbée et de redistribution (à l'aide d'un gouttière percée) sur celle-ci. Sur les côtés, il a ajouté des gouttières latérales pour contenir le ruissellement (enfoncées de 15 cm). En aval, l'eau est récupérée sur toute la longueur et acheminée artificiellement dans le coin (voir figure 2.3).

Les instruments de mesures qu'il a utilisés sont variés : débitmètre en entrée et en sortie de placette, pluviomètre à proximité immédiate de la placette, échantillonnage automatique en entrée et sortie, capteur du potentiel hydrique du sol (pour estimer la propagation du ruissellement à la surface), lysimètres, tensiomètres, humidimètres et piezomètres. Aujourd'hui seuls les lysimètres et les piezomètres sont encore en places et fonctionnels.

2.1.3 Les travaux d'Arnaud Boivin

A. Boivin [Boivin, 2007] en post-doctorat a également travaillé sur ce site pour étudier des événements artificiels afin de mieux comprendre les flux de pesticides dans la parcelle. Lors de son expérience il a procédé en trois étapes :

1. Introduction d'eau et de pesticides dans la parcelle à J
2. Premier lavage à J+2
3. Deuxième lavage à J+21

Du point de vue de l'étude des pesticides, il s'agit d'une seule expérience, mais si on s'intéresse seulement aux flux d'eau, on peut les considérer comme trois événements indépendants. Ce sont ces événements qui vont servir à tester le modèle (voir le paragraphe 2.4.2)



Figure 2.3: Photos du versant avec la parcelle de vigne et la zone enherbée et position de la placette instrumentée [Boivin, 2007]

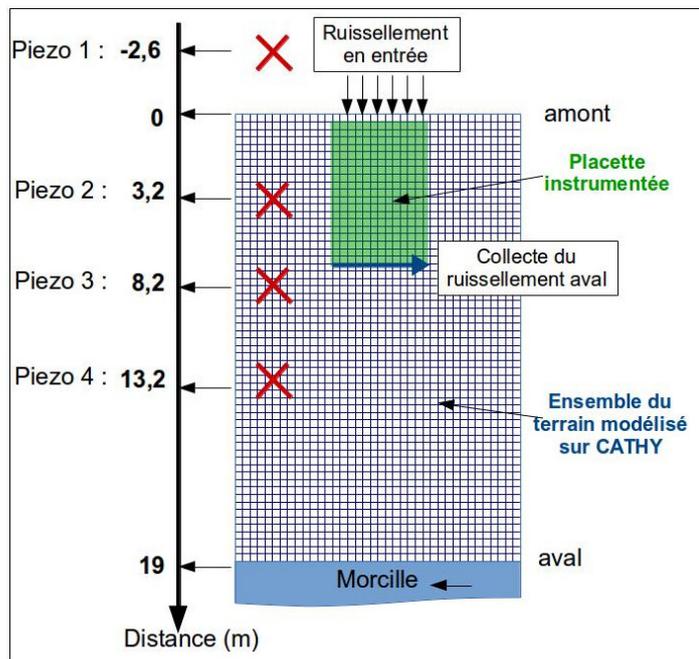


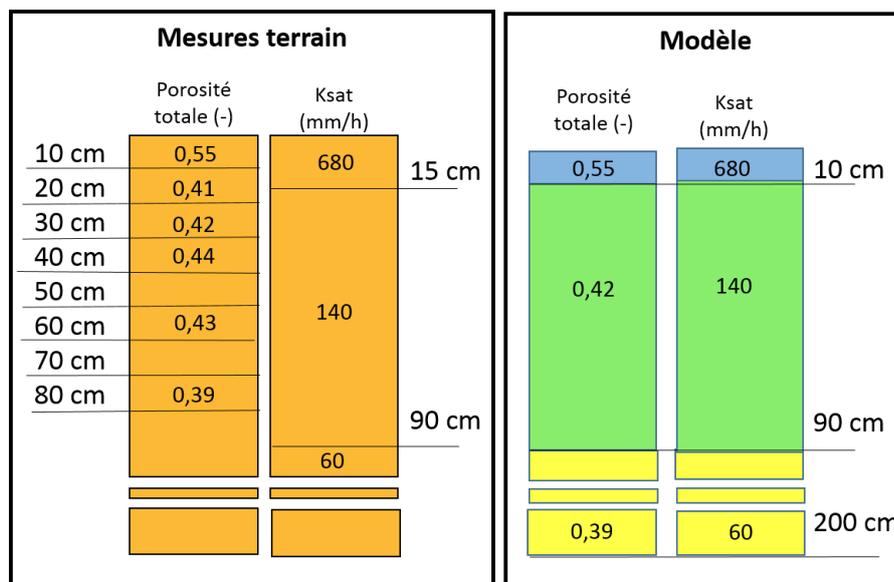
Figure 2.4: Schéma de la bande enherbée de Saint-Joseph en 2006 lors des expériences de Boivin

Lors de ces expérimentations, le ruissellement de surface a progressé sur plusieurs mètres en aval de la zone d'injection d'eau et pour une des simulations (13 avril 2006), de l'eau a même été recueillie dans la gouttière aval (voir figure 2.4). Concernant la circulation de l'eau en subsurface, trois heures après le début de ces expérimentations, l'eau injectée avait atteint la nappe et influencé le niveau piézométrique de celle-ci à un peu plus de 8m en aval de la zone d'injection.

2.1.4 Les propriétés de la bande enherbée de Saint-Joseph

La placette instrumentée sur laquelle Jean-Guillaume Lacas et Arnaud Boivin ont travaillé mesure 4 m sur 6 m. En prenant en considération qu'une rangée de piezomètres se situe en dehors de la placette et que les effets de bords peuvent apparaître, on a choisi de modéliser un terrain plus grand, de 10 m sur 20 m.

Au cours de sa thèse, Lacas a caractérisé les propriétés hydrodynamiques du milieu : teneur en eau à saturation, porosité totale, perméabilité à saturation, perméabilité en régime non saturé. À partir de ses résultats et des besoins de l'étude, nous avons défini trois horizons (voir figure 2.5). Bien qu'il n'existe pas de données terrain mesurée sous 1 m de profondeur, il a été décidé de simuler une épaisseur de sol de 2 m afin de bien visualiser et comprendre les écoulements verticaux.



Note : Pour chaque point de mesure, 5 à 10 répétitions de la mesure ont été effectuées et les valeurs inscrites ici sont issues d'une moyenne géométrique.

Figure 2.5: Schéma des mesures terrain de porosité et de conductivité hydrauliques en profondeur de Lacas (à gauche) à partir desquels la découpe des horizons de l'étude a été définie (à droite).

Le tableau 2.1 présente en détail les valeurs hydrodynamiques et les coefficients de Van Genuchten intégrés dans le modèle, à partir de ces mesures. L'équation de Van Genuchten est une équation classique qui permet de relier les différentes caractéristiques hydrodynamiques du sol (voir équations (B.1) et (B.2), annexe B).

	Horizon 1 (0-10 cm)	Horizon 2 (10-90 cm)	Horizon 3 (90-200 cm)
Porosité totale	0,55	0,42	0,39
Coefficient d'emmagasinement	1, 0,10 ⁻⁵		
Conductivité à saturation ($m.s^{-1}$)	1,88.10 ⁻⁴	4,0.10 ⁻⁵	1,78.10 ⁻⁵
n	1,46	1,52	1,57
Θ_r	0,15		
$\Psi_{(sat)}$	3,13.10 ⁻²	1,00.10 ⁻¹	1,43.10 ⁻¹

Note : n, Θ_r et $\Psi_{(sat)}$ sont les coefficients de Van Genuchten utilisés pour déterminer les courbes de rétention et de conductivité hydrauliques (cf annexe B).

Tableau 2.1: Tableau récapitulatif des propriétés hydrodynamiques du sol de la parcelle de Saint-Joseph [Lacas, 2005] intégrées dans CATHY

2.2 Le modèle CATHY

Pour représenter précisément les flux d'eau et en particulier les interactions surface/subsurface et les transferts latéraux, on choisi de travailler avec un modèle 3D.

CATHY [Camporese et al., 2010] est un modèle hydrologique spécialisé à base physique. Ses deux modules principaux, ruissellement de surface et écoulements en subsurface sont gouvernés par une approximation des équations de St-Venant et l'équation de Richards respectivement.

2.2.1 Caractéristiques principales du modèle

CATHY est un modèle complexe capable de simuler en continu sur plusieurs événements pluvieux. L'écoulement 3D en subsurface prend en compte la hauteur de la nappe et permet donc de simuler des situations de saturation du sol et de ruissellement généré par saturation (ruissellement de Dunne). La flexibilité des paramètres d'entrée du modèle est primordiale pour la suite de l'étude : on peut appliquer des caractéristiques de sol différentes à chaque point du maillage, une variabilité temporelle des conditions aux limites et du forçage atmosphérique est possible.

Si le modèle est précis et complexe sur les modules qu'il intègre, les processus liés aux contaminants ne sont pas modélisables : le transport des substances dissoutes fait partie des capacités du modèle, mais pas leur dégradation, adsorption aux particules de sol, etc... Le module de ruissellement de surface représente des écoulements concentrés (pseudo 2D).

[Gauthier et al., 2009] a montré que les simulations sur CATHY étaient correctement corrélées avec les observations lorsque l'hétérogénéité du sol était bien paramétrée. Cette hétérogénéité est représentée dans le modèle principalement par la conductivité car les autres paramètres ont moins d'influence relativement à celui-ci dans ses conditions d'application.

D'un point de vue pratique, le choix de CATHY 3D est idéal puisque l'équipe Polldiff collabore avec l'INRS et M.Paniconi particulièrement qui a développé le modèle dans les années 90. C'est l'occasion de profiter du soutien, de l'avis et des conseils du développeur du modèle. Depuis sa diffusion, il été validé de nombreuses fois dans la littérature ([Camporese et al., 2010], [Guay, 2010], [Gauthier et al., 2009]).

2.2.2 Description du modèle CATHY 3D

Écoulement souterrain : équation de Richards

L'équation de Richards (2.1) est un bilan entre les flux et la quantité d'eau à l'intérieur du domaine. L'équation est la même en milieu saturé et non saturé, c'est le coefficient d'emménagement σ qui varie. Pour modéliser le flux, on utilise la loi de Darcy (milieu poreux).

Elle s'applique sur un volume représentatif élémentaire (VER). Il s'agit d'un volume de base homogène dans lequel les propriétés du sol sont moyennées. Il doit être :

- suffisamment petit pour que les variations d'un domaine au domaine voisin puissent être approchées par des fonctions continues (de l'ordre du m^3 ou du dam^3)
- suffisamment grand pour contenir un grand nombre de pores afin qu'il soit possible d'y définir une propriété moyenne globale (de l'ordre du cm^3 ou du dm^3)

L'équation de Richards est la suivante :

$$\sigma(S_w) \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla(K_s K_r(S_w)(\nabla\varphi + \eta_z)) + q_s(h) \quad (2.1)$$

Avec $\sigma(S_w)$ ($[1/L]$) le terme général d'emménagement ($\sigma = S_w S_s + \phi \frac{S_w}{d\varphi}$), S_w la saturation, S_s le coefficient d'emménagement spécifique ($[1/L]$); φ la pression ($[L]$), t le temps, K_s ($[L/T]$) et K_r des termes de conductivité ($[L/T]$) (voir ci-dessous), ϕ la porosité, η_z un vecteur (voir ci-dessous) et $q_s(h)$ la terme source (voir ci-dessous).

Calcul de K Dans un milieu non saturé, K est variable et dépend de la saturation (donc est fonction de la pression). On utilise une conductivité relative K_r (2.2) dont la valeur est comprise entre 0 et 1.

$$K = K_s * K_r \quad (2.2)$$

Pour déterminer K , on a donc besoin de K_s (conductivité à saturation mesurée avec des tests de pompage par exemple) et de K_r (conductivité relative) qui peut être calculé avec les équations de Van Genuchten (cf annexe B).

Précision sur la charge hydraulique La charge hydraulique h est définie par : $h = \varphi + z$. Avec φ la pression de l'eau (qui peut être négative quand le milieu est non saturé \rightarrow succion) et z l'énergie d'élévation. C'est le gradient de h qui détermine les écoulements.

Qu'est ce que η_z ? Dans le domaine, la variation dans la direction x (et dans la direction y) correspond à l'équation (2.3) ci-dessous :

$$\frac{\partial}{\partial x}(\varphi + z) = \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (2.3)$$

Par contre dans la direction z :

$$\frac{\partial}{\partial z}(\varphi + z) = \frac{\partial \varphi}{\partial z} + 1 \quad (2.4)$$

Ceci est traduit par le vecteur η_z qui garde la composante d'élévation en vertical :

$$\eta_z = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

Terme source Le terme source $q_s(h)$ représente les sources ou les pertes à l'intérieur du domaine et le terme de couplage entre la surface et la subsurface.

Écoulement de surface : onde de diffusion

L'onde de diffusion (2.6) est une simplification des équations de Navier-Stokes (représentation diffusive et terme cinétique). Elle peut s'écrire :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c_k \frac{\delta Q}{\delta s} = D_h \frac{\partial^2 Q}{\partial s^2} + c_k q_L(h, \varphi) \quad (2.6)$$

où la variable Q ($[L^3/T]$) est la décharge (écoulement volumétrique) en direction de s, t le temps, c_k la célérité de l'onde cinématique ($[L/T]$), D_h la diffusivité ($[L^2/T]$). L'équation est valable en écoulement de surface et en écoulement de rivière, donc de la parcelle au cours d'eau. h représente la lame d'eau : il y a continuité dans les variables entre les équations de surface et de subsurface.

Le sens d'écoulement s représente la direction d'écoulement d'un pixel par rapport à ses 8 voisins (système D8). Localement, le modèle est en 1D mais dans sa globalité, il est à la limite du 2D. CATHY inclut aussi des méthodes plus fines pour modéliser les directions d'écoulement, par exemple la dispersion transversale permet de fixer la direction de s entre deux pixels.

Dans CATHY, on a la possibilité de calculer à chaque maille combien de pixels s'y déversent et faire la distinction entre les mailles de ruissellement (overland flow) et d'écoulement fluvial (streamflow). Par exemple, toutes les mailles qui ont un bassin de décharge supérieure à une certaine aire peuvent être considérées comme des mailles d'écoulement fluvial.

Sheet flow / rivulet flow En mode sheet flow, on considère que le ruissellement qui arrive dans une maille recouvre toute la surface de celle-ci. Dans le cas du rivulet flow (ou rill flow), l'écoulement recouvre seulement une partie de la surface de la maille en fonction des directions d'écoulement. Quand les résolutions sont larges, on utilise plutôt rill flow mais dans notre cas, la maillage est suffisamment fin pour être en sheet flow.

Le maillage

En surface, le maillage est donné par un modèle numérique de terrain MNT (ou DEM "Digital Elevation Model"). Chaque pixel carré est coupé en deux pour former deux triangles. Il est possible de former seulement deux triangles avec 4 pixels ou même 9. Tout dépend de la précision du maillage que l'on veut obtenir et de l'espace de calcul disponible sur l'ordinateur.

Pour le maillage souterrain, on projette les triangles sur les couches puis on forme des tétraèdres : 3 tétraèdres entre deux triangles de couches horizontales.

Comme le maillage est dépendant des cellules du MNT, il est uniforme et non adaptable spatialement.

Deux types de maillage souterrain peuvent être envisagés : soit les couches souterraines suivent la topographie de surface et leur hauteur est constante, soit la base est fixée à une profondeur précise par rapport au point le plus bas et l'épaisseur des couches varie selon la topographie.

Les conditions aux limites

Les conditions aux limites peuvent varier dans le temps et l'espace. Il en existe quatre types :

- condition de Dirichlet : condition de potentiel / charge
- condition de Neumann : condition sur le flux
- condition atmosphérique : condition de flux pouvant passer à une condition de potentiel lorsque que le flux entrant est supérieur à la perméabilité du milieu.
- surface de suintement (seepage face) : condition de flux nul pouvant passer à une condition de potentiel constant lorsque le potentiel des noeuds adjacents est supérieur à 0.

Interface surface-subsurface : changement de conditions aux limites En fonction de la situation hydrographique du terrain, les conditions aux limites peuvent changer entre Neumann et Dirichlet. A chaque pas, le modèle "analyse" la situation et change les conditions aux limites si besoin.

Cas non saturé Dans le cas non saturé sans pluie, la pression de surface est inférieure à zéro, mais on connaît le flux (nul) : les conditions de Neumann sont appliquées.

Quand il commence à pleuvoir mais que le forçage de la pluie est inférieur à la conductivité hydraulique, toute l'eau qui tombe s'infiltrer et le flux est égal au forçage : condition de Neumann.

Lorsque la pluie devient supérieure à la conductivité hydraulique, on passe en situation de ponding, c'est-à-dire qu'il se forme une lame d'eau au dessus de la surface. La pression à la surface devient positive. On passe alors en condition de Dirichlet et la pression est définie par la hauteur de la lame d'eau.

Si il s'arrête de pleuvoir ou que la pluie diminue d'intensité et que le sol devient capable d'infiltrer la lame d'eau, le flux dépasse le forçage : c'est le signal pour passer en condition de Neumann.

Cas saturé Lorsque la nappe remonte lors d'un événement de pluie et que le milieu devient saturé, c'est la pression que l'on connaît donc on applique la condition de Dirichlet.

Synthèse Quand on applique la condition de Neumann, les limites sont contrôlées par les conditions atmosphériques et lorsqu'on applique la condition de Dirichlet, ce sont les propriétés du sol qui exercent le contrôle.

Si on note K la conductivité hydraulique de la couche de surface, R la variable de forçage (pluie), i le flux d'infiltration et φ la pression de l'eau à la surface :

$$\varphi < 0 \text{ ou } i = R \text{ (car } R < K) \rightarrow \text{condition de Neumann} \quad (2.7)$$

$$\varphi = 0 \text{ ou } i < R \text{ (car } R > K) \rightarrow \text{condition de Dirichlet} \quad (2.8)$$

2.2.3 La simulation

Le preprocessing

Le preprocessing permet de créer le maillage 2D de la surface pris en compte par Cathy. Le maillage 3D est ensuite généré à partir du maillage de surface. Il existe deux façons de le définir :

- Soit l'utilisateur part d'un fichier de MNT "complet" (c'est-à-dire que les limites du bassin versant ne sont pas encore repérées et le preprocessing s'en charge).
- Soit l'utilisateur fournit un fichier texte d'altitude du bassin versant pré-découpé.

Les fichiers d'entrée pour le processing

La modèle CATHY dispose d'une dizaine de fichiers d'entrées. Certains ne sont utilisés que dans des cas précis (par exemple lorsqu'il y a des étendues d'eau sur le bassin versant ou lorsque le socle géologique du terrain a une disposition particulière) et d'autres sont indispensables à chaque simulation :

- atmhc : fixer les conditions atmosphériques qui peuvent être variables dans le temps et dans l'espace.
- dem_parameters : spécifier les paramètres du maillage 3D : nombre de couches et leur épaisseur, profondeur de la base, ...
- ic : fixer les conditions initiales du terrain, c'est-à-dire la hauteur de nappe qui peut être variable dans l'espace.

- nansfneubc et nansfdirbc : définir les noeuds sur lesquels on impose une condition de Neumann ou une condition de Dirichlet. Les conditions peuvent varier dans le temps.
- parm : paramétrer la simulation : options de résolution numérique des équations, conditions d'itération et de backstepping, spécification des numéros de noeuds dont la sortie va être détaillée, ...
- sfbc : décrire des profils de seepage face
- soil : spécifier les propriétés du sol (conductivité à saturation dans les trois directions de l'espace, coefficient spécifique d'emmagasinement, porosité), le type d'approximation des courbes de rétention choisi (dans notre cas il s'agit des équations de Van Genuchten).
- Cathy.H : renseigner les "dimensions" de la simulation pour que la mémoire nécessaire soit allouée.

2.3 L'outil de génération de champs statistiques

Pour tester les effets de la variabilité spatiale sur l'écoulement de l'eau, on génère des champs de valeurs de conductivité hydraulique. Les champs suivent des lois de distribution statistiques : loi normale, lognormale et sont générés par un outil développé par Etienne Leblois à l'IRSTEA (voir annexe D, figure D.1). Pour chaque champs, on peut fixer la loi, la moyenne, l'écart-type mais aussi le coefficient de d'auto-corrélation et il est également possible de conditionner les champs avec des mesures ponctuelles de terrain.

Initialement, cet outil est destiné à générer des pluies variables dans le temps : les champs générés sont en trois dimensions (x, y, temps). Dans notre cas on peut considérer que la dimension du temps est remplacée par la dimension z de profondeur.

2.4 Méthode

2.4.1 Prise en main du modèle

La phase de prise en main du modèle CATHY a duré un peu plus d'un mois. Le but était double : se familiariser avec les fonctionnalités du modèle mais aussi tester ses réactions avec différentes configurations (conditions aux limites, conditions initiales, forçage atmosphériques, ...)

2.4.2 Test du modèle

Le modèle n'a pas eu besoin d'être validé au sens strict puisque le but de l'étude de concerne pas la bande de Saint-Joseph en particulier, il s'agit plutôt d'analyser la réponse du modèle à des variations de paramètres d'entrée. Cependant, pour s'assurer que CATHY se rapproche d'un comportement "réel" et que l'on travaille dans des conditions réalistes physiquement, le modèle a été testé sur trois expériences de ruissellement conduits par A.Boivin en 2006.

Les trois événements utilisés pour les tests

Les trois expériences sont basées sur un même protocole (si on ne tient pas compte de la partie concernant les pesticides) : pas de pluie et injection d'un flux de 250 mm/h en moyenne pendant 40 min sous forme de ruissellement à l'amont de la parcelle instrumentée.

On dispose des données de 4 piezomètres (voir schéma 2.4) avant le début de l'expérience et pendant (séries de mesures avec des intervalles de 5 à 10 min), du débit d'entrée et du débit de ruissellement en sortie quand il y en a.

Par le passé, des expérimentations diverses (essais de traçages, injections d'eau ...) ont montré qu'il existait un écoulement préférentiel en subsurface sur le site de la Morcille : le flux d'eau a tendance à se décaler vers la droite donc vers le transect de piezomètres. Pour les expériences de 2006, le ruissellement se limite à la largeur de la placette instrumentée (figure 2.4).

Etat initial du terrain

Les conditions aux limites Les conditions limites amont et aval choisies pour représenter au mieux les conditions de l'expérimentation sont représentées sur la figure 2.6.

Les conséquences de ces choix seront testées et discutées dans la partie résultats (paragraphe 3.1.2).

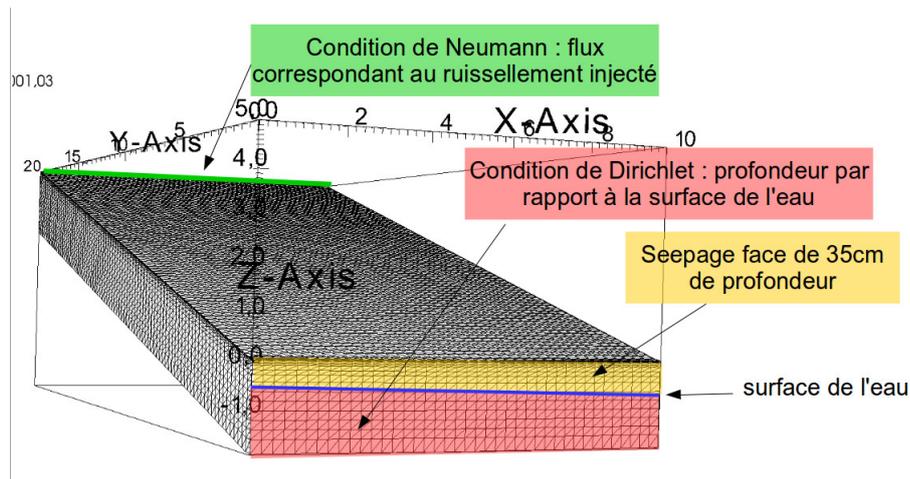


Figure 2.6: Schéma des conditions limites amont et aval qui représentent au mieux les conditions d'expérimentation

Hauteur de nappe La hauteur de la nappe à l'état initial avant chacune des expériences a été calculée à chaque point du terrain en extrapolant les mesures des quatre piézomètres par interpolation linéaire (figure 2.7).

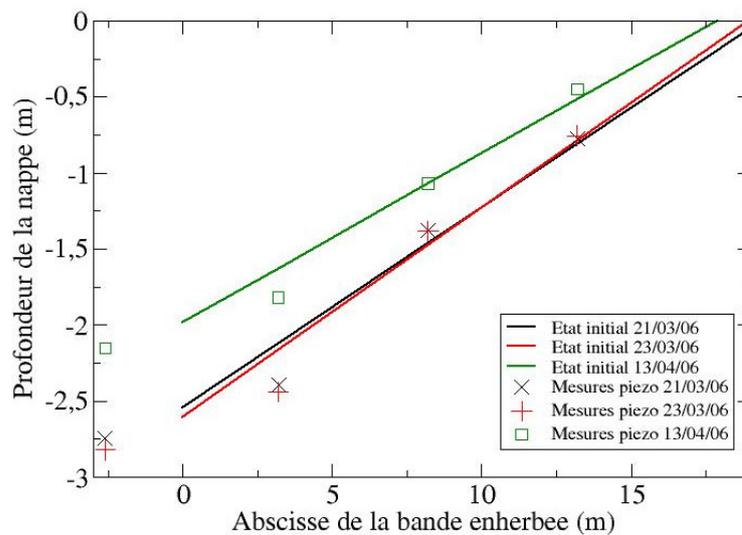


Figure 2.7: Profondeur de la nappe à l'état initial associée aux mesures piézométriques pour chaque événement avec interpolation linéaire des points de mesure

En extrapolant linéairement les quatre mesures, la nappe affleure la surface du sol en aval. Comme la Morcille coule environ 30 cm plus bas que la surface de la bande en aval (voir figure 3.2), on peut dire que la nappe n'affleure sûrement pas. On obtient ce résultat par manque de mesure (le piézomètre le plus en aval se trouve à 6 m de la Morcille) et surtout parce que la profondeur de la nappe n'est pas linéaire en se rapprochant du cours d'eau. L'extrapolation des données serait donc à revoir.

Partie 3

Résultats

3.1 Sensibilité du modèle à certains paramètres

Dans cette première partie, on a cherché à tester le modèle sur différents paramètres et notamment sur les choix que l'on a fait en cherchant à se rapprocher des conditions de l'expérience de Boivin : raffinement du maillage, conditions aux limites, rugosité, conductivité hydraulique.

Les tests menés ne correspondent pas exactement à la situation terrain : les conditions initiales et aux limites sont choisies pour chaque paramètre afin de mettre au mieux en valeur son influence dans le modèle CATHY (voir tableau 3.1 ci-dessous).

	Maillage	CL aval	CL amont	Rugosité	Ks
Durée totale de la simulation	7 jours	7 jours	24h	24h	24h
Profondeur de la nappe	0 m	0 m	1 m	0.20 m	CI de Boivin
Entrée d'eau	non	non	oui	oui	oui
Si oui, type d'entrée	-	-	forçage amont	pluie	CL de Boivin

Tableau 3.1: Tableau récapitulatif des simulations de tests du modèle à la sensibilité de divers paramètres

3.1.1 Sansibilité au raffinement du maillage

Comme on va imposer brutalement un flux conséquent comme condition limite, le maillage doit être assez fin sinon le modèle ne convergera pas. Par contre, plus on raffine les mailles, plus le temps de calcul augmente. Il s'agit de trouver un juste milieu entre les capacités de calcul de l'ordinateur et les conditions de convergence du modèle.

Dans CATHY, la liberté que l'on peut prendre avec le maillage est assez limitée : celui-ci est forcément triangulaire et uniforme sur toute la surface et c'est le même qui est projeté verticalement en profondeur. L'avantage dans cette représentation de la bande enherbée de la Morcille est que l'on ne s'appuie pas sur des données réelles, mais on fait l'hypothèse que le terrain est régulier avec une pente homogène : on maîtrise la "résolution" des mailles du surface.

Le niveau de complexification du modèle a augmenté au cours de l'étude. Le maillage a été affiné pour augmenter les capacités de convergence. La taille des mailles a été fixée par un compromis entre convergence et capacité de calcul de l'ordinateur. Quel aurait été l'impact sur les résultats si la capacité de calcul disponible avait été plus ou moins importante ?

Des simulations de vidange simple ont été menées mais cette fois-ci avec des niveaux de complexification différents qui sont décrits dans le tableau 3.2).

	niveau 1	niveau 2	niveau 3	niveau 4
Nature du sol	3 horizons	3 horizons	3 horizons	3 horizons
Dicrétisation verticale	3 couches	10 couches	15 couches	15 couches
Discrétisation de surface	50 cm	50 cm	50 cm	25 cm
Nombre total de noeuds	2583	8610	12946	49815

Note : la "dicrétisation de surface" correspond à la largeur des mailles en surface.

Tableau 3.2: Description des quatre niveaux de complexité testés

On peut faire les observations suivantes à partir des résultats des simulations (graphique 3.1) :

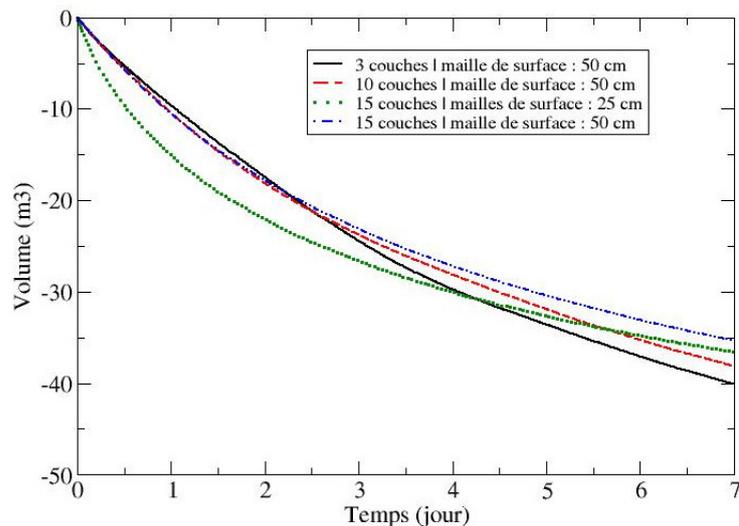


Figure 3.1: Comparaison des volumes sortants du terrain selon le raffinement du maillage après une simulation de 7 jours

	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
Temps CPU	5.35E+05	9.60E+05	1.43E+06	1.55E+07

Tableau 3.3: Tableau présentant les temps CPU (Central Processing Unit) pour chaque simulation

- La variation des volumes cumulés sortants entre les quatre niveaux de complexité de la représentation de la bande enherbée est du même ordre de grandeur qu'en ce qui concerne les simulations testant la sensibilité du modèle aux conditions limites aval (voir paragraphe 3.1.2).
- Affiner la discrétisation dans le sens vertical (entre les niveaux 1, 2 et 3) ne change que très légèrement l'allure de la courbe et les bilans d'eau sont proches même après 7 jours de simulation.
- Par contre l'augmentation de la résolution des mailles en surface change l'allure de la courbe. Si on s'attache au premier jour de simulation (durée des futurs tests de variabilité spatiale), la différence est flagrante : plus de 30 % de différence entre le niveau 3 et 4 concernant le volume sortant du domaine.
- le temps de calcul CPU (tableau 3.3) augmente surtout avec le raffinement de la discrétisation de surface (et donc la multiplication du nombre de noeuds).

3.1.2 Tests sur les conditions aux limites

Par défaut dans CATHY, les conditions aux limites appliquées aux noeuds en bordure sont en condition de Neumann: flux nul. Pour la partie aval de la bande enherbée et notamment à proximité de la maille exutoire, il a fallu adapter les conditions aux limites en essayant de reproduire au mieux les conditions de l'expérimentation.

En aval

Sur le terrain, on observe la présence d'une surface de suintement (seepage face) à la limite aval de la bande enherbée (voir figure 3.2). Cette photo rend compte de l'état du terrain à la date où elle a été prise, le 15 avril 2014. Il n'est pas exclu qu'à d'autres périodes de l'année, la hauteur de la seepage face soit différente. Pour tester l'influence de la hauteur de la seepage face sur l'écoulement de l'eau, quatre simulations de vidange simple (sans forçage atmosphérique ni flux d'eau venant de l'amont) ont été menées avec quatre hauteurs de seepage face différentes : 10 cm, 25 cm, 50 cm, ou 90 cm.

Tout d'abord, on peut observer que le comportement suit la logique attendue (figure 3.3) : plus la surface de suintement est profonde, plus le volume d'eau qui sort de la bande enherbée est importante.

Le volume d'eau initialement contenu dans le terrain était de $163 m^3$. En 7 jours, le terrain a perdu entre 23% et 26% du volume initial (tableau 3.1.2). L'erreur entre les conditions 2 et 4 est assez élevée (près de 10%) mais d'après les informations dont on dispose concernant la parcelle, la variation saisonnière



Figure 3.2: Photo de la limite aval de la bande enherbée avec la Morcille (15 avril 2014)

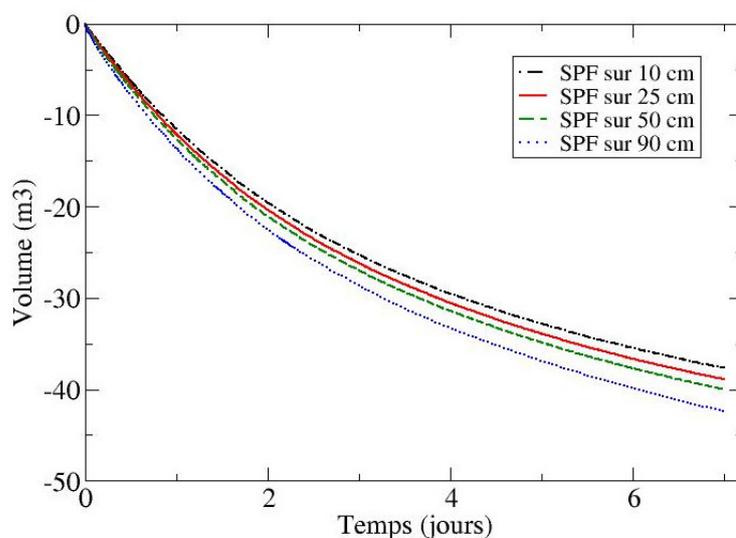


Figure 3.3: Volume cumulé sortant pour quatre hauteurs de seepage face (SPF) différentes pour une simulation de 7 jours

	SPF 10 cm	SPF 25 cm	SPF 50 cm	SPF 90 cm
Volume total sortant (m^3)	-37,7	-38,9	-40,0	-42,4
% perte par rapport au volume total	23	23	24	26
% d'erreur (par rapport à la condition 2)	-3,2	0	2,9	9,0

Note : les erreurs sont calculées par rapport à la condition 25 cm puisque c'est celle observée sur le terrain.

Tableau 3.4: Comparaison des volumes sortants du terrain selon la profondeur de la seepage face (SPF) en aval après une simulation de 7 jours

de la hauteur de la surface de ruissellement atteint seulement quelques centimètres. Donc les conditions aval n'influencent pas significativement le fonctionnement de la bande enherbée dans cette situation.

En amont

Pour simuler un ruissellement en amont qui arriverait de la parcelle de vigne au dessus de la bande enherbée, plusieurs possibilités sont envisageables :

- Neumann : imposer un flux non nul à la rangée de noeuds la plus à l'amont en surface. Cette condition ne correspond pas exactement à du ruissellement puisque le flux injecté dans les noeuds à l'interface surface-subsurface est considéré comme injecté en subsurface par le modèle. En imposant des caractéristiques "imperméables" ($K = 10^{-6}$) sur les 50 premiers centimètres de la bande enherbée, on force le flux à se convertir en ruissellement.
- Dirichlet : imposer une charge fixe en amont correspondant à la lame d'eau du ruissellement arrivant sur la parcelle

- Atmosphérique : appliquer une pluie locale sur la première rangée de noeuds.

Pour les deux dernières possibilités, il est aussi envisageable d'ajouter une bande imperméable de 50 cm de large afin de stimuler le départ du ruissellement. Dans les cinq cas (condition de Neumann avec et sans bande imperméable, condition de Dirichlet avec et sans bande imperméable, condition atmosphérique), l'événement dure 60 min et a une intensité équivalente selon le type de conditions aux limites : 300 mm/h pour les conditions limites Neumann ou une lame d'eau de 9.5 cm pour les conditions de Dirichlet (le volume qui ruisselle est ainsi toujours le même).

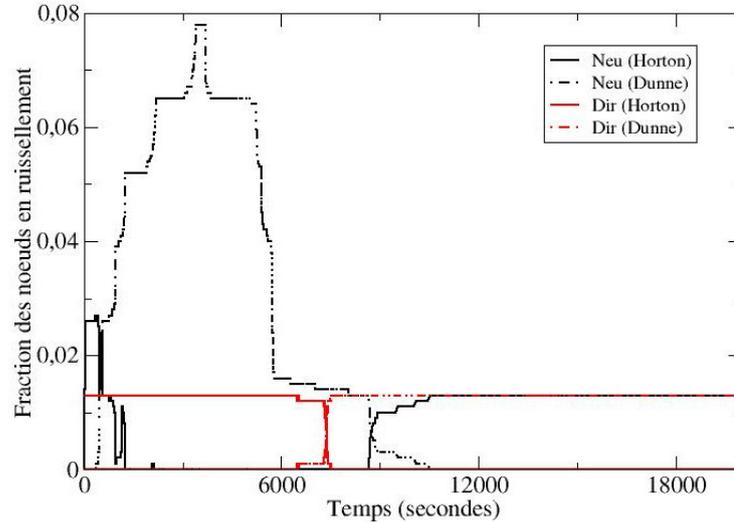


Figure 3.4: Graphique représentant la fraction du nombre total de noeuds en situation de ruissellement Dunne ou Horton dans deux cas de conditions amont : condition de Neumann ou condition de Dirichlet (pour les deux : avec une bande imperméable sur les 50 premiers centimètres du domaine)

La figure 3.4 permet de mieux comprendre la propagation du ruissellement sur la surface dans deux situations de conditions limites : condition de Neumann et condition de Dirichlet avec une bande imperméable sur les 50 premiers centimètres. Il s'agit de la fraction des noeuds en situation de ruissellement sur l'ensemble du domaine. On distingue le ruissellement de type Dunne (par saturation du sol) et Horton (par dépassement de la capacité d'infiltration).

Dans les cas de la condition de Neumann, on peut observer une courbe du ruissellement de Dunne en paliers. Chaque palier correspond à 1,2 % des noeuds du domaine, c'est à dire une rangée horizontale selon la direction x . Il est possible de déterminer visuellement ici qu'une partie de l'eau de l'événement ruissellant entrant a été transportée en surface sur 6 rangées, c'est-à-dire 1,5 m de long à partir de l'amont.

Avec des conditions amont de Dirichlet, aucun ruissellement ne s'est propagé sur la surface (la lame d'eau se borne à la rangée sur laquelle elle a été appliquée). On retrouve un résultat très semblable pour les simulations avec des conditions atmosphériques.

La bande imperméable n'a pas d'influence sur le ruissellement de l'eau déjà en surface. On la conserve dans le cas des conditions de Neumann puisque que l'eau n'est pas en surface dès le départ, il faut la "forcer" à remonter de subsurface à surface.

Au vu des résultats, on prendra par la suite des conditions amont de type Neumann : ce sont les seules qui semblent générer efficacement du ruissellement.

3.1.3 Rugosité de la surface du sol

La rugosité de la surface du sol est un paramètre influençant le ruissellement. Dans CATHY, elle est intégrée au modèle dans le preprocessing sous la forme du coefficient de Strickler.

La gouttière récupératrice présente sur le terrain lors des expérimentations de Boivin a été ajoutée à la représentation 3D de la bande enherbée sur CATHY.

À l'origine, ce coefficient est plus utilisé pour rendre compte de la rugosité des parois de canalisation ou de cours d'eau mais il existe aussi des abaques qui concernent les surface inondables (voir [Vasquez, 2010] par exemple). C'est le type de végétation qui conditionne la valeur du coefficient de Strickler. Plus il est élevé, plus la rugosité est faible et plus le ruissellement sera facilité.

Sur le site de la bande enherbée de saint-Joseph, on trouve des herbes de tailles moyenne qui cohabitent avec les mauvaises herbes. Selon les abaques, le coefficient de Strickler varie de 6 à 30. Trois simulations de

ruissellement ont été lancées avec trois valeurs de Strickler : 6, 15 et 30. Dans tous les cas, la profondeur de la nappe est homogène à 0.2 m sous la surface à l'état initial et on impose une pluie d'intensité 200 mm/h pendant 60 minutes (voir figure 3.5).

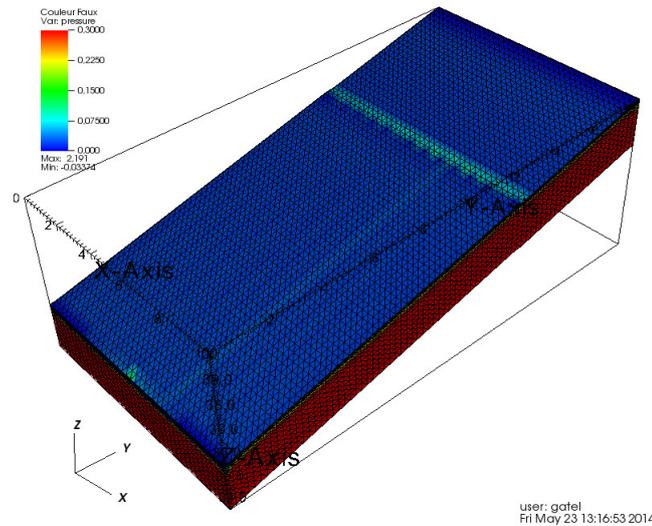


Figure 3.5: Représentation 3D de la pression sur le domaine à $t=3600$ s de la simulation avec un Strickler à 6

Sur cette vue en 3D qui représente la pression, on voit le ruissellement généré sur la surface. La bande horizontale où s'accumule l'eau correspond à la gouttière récupératrice en aval de la placette instrumentée.

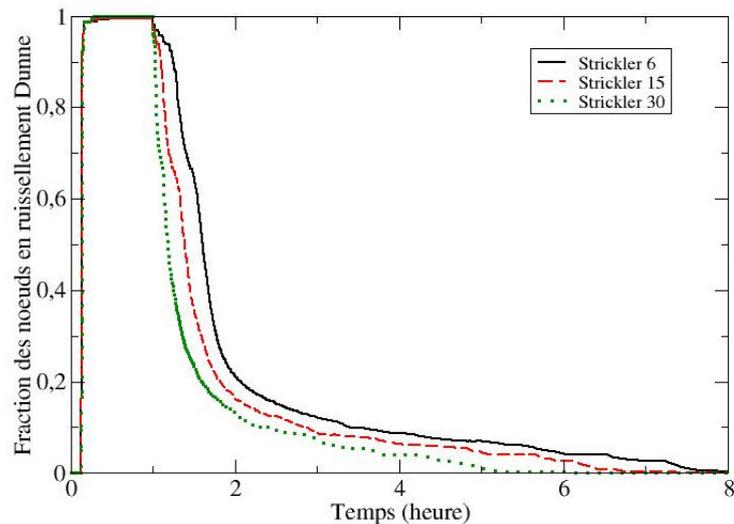


Figure 3.6: Évolution de la fraction de noeuds en ruissellement de type Dunne dans le temps au cours de trois simulations avec des coefficients de Strickler différents

La figure 3.6 montre que plus le coefficient de Strickler est grand, plus le ruissellement est facilité. Ce graphique peut sembler contradictoire avec la logique du coefficient de Strickler mais l'analyse des bilans d'eau confirme l'interprétation suivante : si le ruissellement d'une simulation avec un Strickler élevé a une durée plus courte par rapport aux Strickler plus bas, c'est parce qu'il se propage très rapidement et l'eau sort plus rapidement du système.

3.1.4 La conductivité hydraulique à saturation

Dans la littérature [Lacas, 2005], la conductivité hydraulique est considérée comme le paramètre le plus influent dans les écoulements d'eau en subsurface. Avant de pouvoir commencer à tester l'influence de la variabilité spatiale sur les écoulements de l'eau de manière plus systématique, on va vérifier que le modèle a un comportement "réel" ou proche de la réalité à partir des expériences de Boivin. Pour cela on simule différentes situations (figure 3.7)

- une conductivité moyenne uniforme sur toute la profondeur ($5.12E-5 \text{ m.s}^{-1}$)
- une conductivité uniforme par horizon sur 3 horizons (respectivement pour les horizons 1, 2 et 3 : $1.88E-4 \text{ m.s}^{-1}$, $4.0E-5 \text{ m.s}^{-1}$, $1.78E-5 \text{ m.s}^{-1}$)
- idem mais avec les conductivités latérales multipliées par 10 (respectivement pour les horizons 1, 2 et 3 dans les directions x et y : $1.88E-3 \text{ m.s}^{-1}$, $4.0E-4 \text{ m.s}^{-1}$, $1.78E-4 \text{ m.s}^{-1}$).

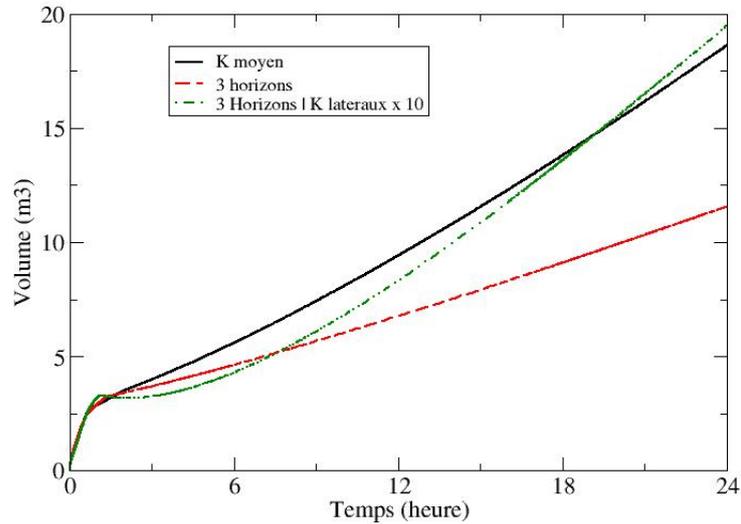


Figure 3.7: Comparaison des volumes sortants du terrain selon la conductivité hydraulique du sol après une simulation de 24 h

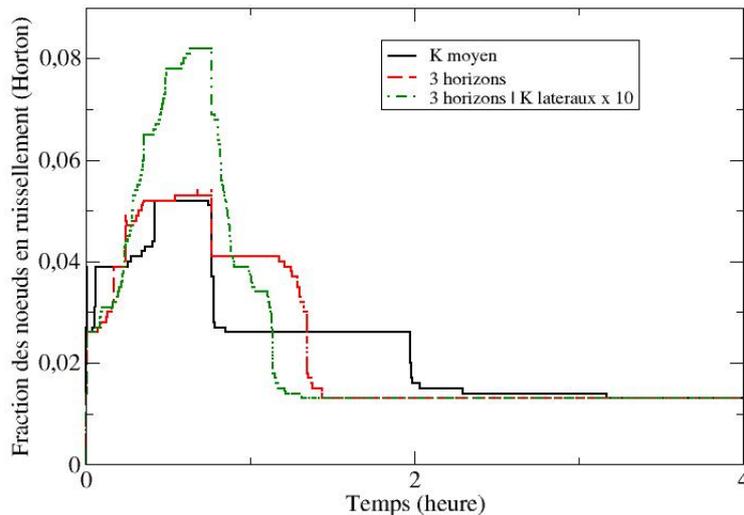


Figure 3.8: Comparaison de l'évolution de la fraction des noeuds en ruissellement selon la conductivité hydraulique du sol après une simulation de 24 h

Les deux figures 3.7 et 3.8 montrent d'abord à quel point la conductivité hydraulique influence les écoulements de l'eau dans le sol. Après seulement 24h, le cumul des volumes sortants varie de 30% entre les trois cas et si on multiplie la conductivité hydraulique latérale par 10, près de deux fois plus de noeuds sont touchés par le ruissellement.

Les simulations montrent que la hauteur de nappe ne varie pas plus loin que deux mètres en aval de la zone d'injection d'eau, ce qui n'est pas le cas dans les observations terrain (voir paragraphe 2.1.3) et le ruissellement n'atteint pas l'aval de la placette instrumentée. Ainsi, le modèle actuel surestime l'infiltration par rapport aux observations sur le terrain.

On a vu que dans la littérature, des cas sont décrits où le modèle CATHY reproduit des observations terrain de façon très acceptable. Ici, il faut rester conscient que le domaine et les conditions expérimentales ne sont pas décrites de façon suffisamment précises dans le modèle pour reproduire les observations : on a simplifié beaucoup de paramètres et la microtopographie n'est pas du tout prise en compte, alors qu'elle peut générer des écoulements de surface préférentiels jouant un rôle primordial.

3.1.5 Synthèse sur la sensibilité du modèle

Les tests révèlent que le modèle CATHY est stable par rapport au maillage dans ces conditions de simulation. Il est relativement peu sensible à la rugosité du sol et à la hauteur de la seepage-face en aval. Les conditions limites que l'on choisies (flux fixé par des conditions Neumann) sont les seules qui permettent de générer du ruissellement.

Comme annoncé dans la littérature, la conductivité hydraulique a une grande influence sur les écoulements de l'eau. Le modèle actuel n'a pas un comportement réel si on compare les résultats aux données terrain mais pour l'instant, les simulations ont été menées sur un sol homogène à 3 horizons. Au vu de l'influence de la conductivité et de sa grande variabilité détectée sur le terrain, il peut être intéressant d'intégrer de l'hétérogénéité dans les caractéristiques du sol et déterminer si le domaine y est sensible et s'il aura un comportement plus réel.

3.2 Etude de l'influence de la variabilité spatiale

3.2.1 Les champs statistiques générés

Des mesures de terrain très variables

Jean-Guillaume Lacas a mené une campagne de mesures de la conductivité sur la bande enherbée de Saint-Joseph en 2004. On dispose d'une trentaine de mesures dont la majorité concerne un sol peu profond (moins de 15 cm sous la surface). Les valeurs qu'il a intégrés dans son modèle sont des moyennes géométriques des mesures sur les 4 horizons. Les écarts-type correspondant aux calculs de moyenne qu'il a effectués sont assez grands (voir tableau 3.5).

	Nombre de mesures	Moyenne géométrique (mm/h)	Ecart-type (mm/h)
0 - 10cm	12	676	330
10 - 40 cm	12	144	250
+ 40 cm	5	64	130

Tableau 3.5: Tableau des moyennes géométriques et écarts-type des conductivités hydrauliques mesurées par Lacas

Détail des champs générés

L'outil d'Etienne Leblois (IRSTEA) permet de générer des champs statistiques en jouant sur différents paramètres, et notamment la loi statistique, la longueur de corrélation et la possibilité de conditionner les champs avec les mesures terrain.

Dans la littérature, il est rapporté que la loi qui s'adapte au mieux aux variations spatiales des caractéristiques du sol est la loi lognormale. Très peu de publications abordent la longueur de corrélation de la conductivité hydraulique dans un sol. D'après [Vauclin et al., 1994], cette longueur de corrélation peut atteindre 20 m et une étude en cours [?] considère une longueur de 8 m. C'est donc sur ces deux valeurs que les simulations ont été basées pour une première approche (voir tableau 3.6).

Pour chaque simulation, trois champs sont nécessaires : un pour chaque horizon. Ces champs, possédant des caractéristiques différentes en terme de moyenne et d'écart-type, sont générés indépendamment les uns des autres. On discutera dans le paragraphe 3.2.2 les conséquences de cette méthode.

Le conditionnement se base sur les mesures terrain de Lacas effectuées en 2004. Pour chacun des deux premiers horizons, il existe 8 points de mesures (voir annexe D). Aucune mesure n'a été faite à partir de 90 cm d'épaisseur, l'horizon 3 n'est donc pas conditionné.

Dans chacun des cinq cas, l'objectif est d'obtenir 10 simulations afin d'être capable de tirer des conclusions statistiques.

	loi statistique	longueur de corrélation	conditionnement
Cas 0	Gauss	0	non
Cas 1	Lognormal	0	non
Cas 2	Lognormal	20 m	non
Cas 3	Lognormal	8 m	oui
Cas 4	Lognormal	20 m	oui

Tableau 3.6: Caractéristiques des 5 cas de simulation avec des conductivités hétérogènes

Problème posé par les écarts-type élevés

Un problème s'est posé avec la gestion de ces champs : à cause des écarts-type très élevés (calculés à partir des mesures terrains), des valeurs extrêmes sans sens physique sont apparues. En effet, sur un terrain comme celui de Saint-Joseph, on considère qu'une conductivité hydraulique supérieure à $10^{-3}m.s^{-1}$ (ce qui correspond à la conductivité dans des graviers) était très peu vraisemblable. Les valeurs négatives ont aussi été tronquées.

Les champs hétérogènes générés ont donc été tronqués de manière à ce que toutes les valeurs soit contenues dans un intervalle acceptable : entre 0 et $10^{-3}m.s^{-1}$. Dans les champs générés par loi lognormale, moins de 1% des valeurs ont été ainsi tronquées : les champs ont été très peu altérés par cette opération. Par contre pour le cas 0 (champs générés avec une loi de Gauss), la troncature atteint 15% pour certains horizons et influence donc beaucoup la distribution des conductivités (voir annexe C, figure C.1), celle-ci se rapprochant plus d'une gaussienne tronquée que d'une gaussienne.

3.2.2 Détail de simulations

Conditions initiales et conditions aux limites

Les conditions initiales et aux limites ont été fixées pour faciliter les comparaisons et assurer au mieux la convergences des simulations :

- Niveau de nappe uniforme à 1,5 m sous la surface : les variations de hauteur de la nappe sont plus facilement décelables
- Injection d'eau ruisselante (au total $2,5 m^{-3}$ pendant 40 min) : méthode comparable aux expériences de Boivin mais le volume d'eau injecté a été divisé par deux pour faciliter la convergence.

Le taux de convergence

Malgré les précautions prises, des problèmes de convergence sont apparus, à tel point qu'il n'a pas été possible d'atteindre l'objectif des 10 simulations par cas (voir tableau 3.7).

	Nb de simulation lancées	Nb de simulations convergées	taux de convergence
Cas0	20	10	0.5
Cas 1	10	6	0.6
Cas 2	30	6	0.2
Cas 3	20	6	0.3
Cas 4	20	11	0.55

Tableau 3.7: Taux de convergences des simulations selon les cas

La méthode d'association des 3 champs représentant chacun un horizon peut expliquer ce taux très faible de convergence. En effet, les champs sont générés séparément et associés au hasard. Certaines associations peuvent être problématiques si les champs sont très différents par exemple sur la figure 3.9. Selon les horizons, (et au delà de moyennes de conductivité différentes), la répartition des zones imperméables ou perméables sur la bande enherbée peut être très différente, ce qui pourrait expliquer l'absence de convergence dans certains cas. Même si on peut supposer que les 3 horizons de sol peuvent être très différents et ont été structurés différemment, une corrélation verticale entre les 3 horizons serait plus cohérente, notamment pour représenter les écoulement préférentiels (macropores). Cela n'a pas été possible avec l'outil mais fait partie des perspectives.

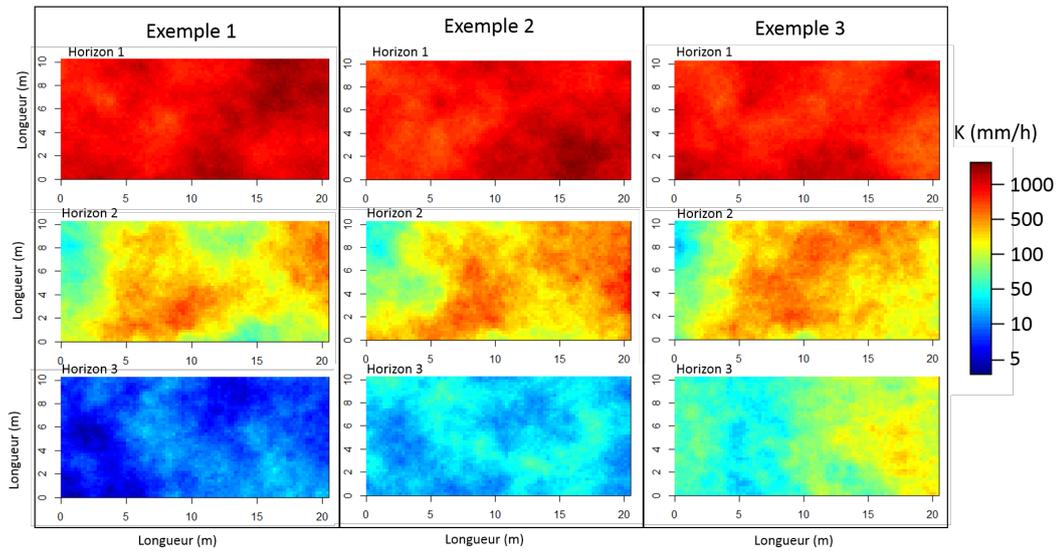


Figure 3.9: Trois exemples d'association de champs hétérogènes de conductivité hydraulique (Ces champs correspondent au cas 3 : avec le conditionnement et une longueur de corrélation de 8 m)

Méthode de comparaison

Trois variables ont été choisies pour comparer les écoulements du sous-sol dans les quatre cas simulés. (i) Le ruissellement permet d'avoir une idée de la capacité d'infiltration du sol, et de la dynamique d'écoulement de l'eau à la surface. (ii) La capacité de rétention du sol renseigne sur la capacité de stockage de la bande enherbée : il s'agit de la différence des cumuls des volumes entrant et sortant de la bande enherbée. (iii) La dynamique des écoulements souterrain est évaluée par une appréciation qualitative de l'avancée des eaux dans le sous-sol et de la réaction de la nappe.

3.2.3 Résultats des simulations basées sur les champs générés avec la loi lognormale

Ruissellement et capacité de rétention de la bande enherbée La figure 3.10 présente graphiquement les résultats concernant le ruissellement et la capacité de rétention du sol. Dans un premier temps, on peut remarquer l'absence de différences flagrantes entre simulations conditionnées ou non.

Concernant le ruissellement, la dynamique de départ (les 40 premières minutes, pendant l'injection d'eau) est très semblable pour chacun des cas. En effet, si on analyse avec des boxplots le ruissellement maximum atteint (figure 3.11) sur l'ensemble des simulations, on voit que celui-ci est très stable selon les cas. Il approche en moyenne 2% des mailles, c'est à dire 4 rangées de mailles. Comme les mailles sont des carrés de 25 cm de côté, on peut en déduire que l'eau ruisselle jusqu'à 1 m en aval de la zone d'injection. A partir de l'arrêt de l'injection d'eau dans le système, on observe des différences graphiques. C'est le cas 1 qui semble être le plus variable, en effet lors d'une simulation, l'eau met 5h à s'infiltrer contre 3 h maximum pour les cas 2, 3 et 4. Sur cet événement, le ruissellement est donc peu sensible aux variations de conditionnement. En gardant à l'esprit que le ruissellement dans cette situation touche moins de 3% du total des mailles, on peut penser qu'en injectant plus d'eau le ruissellement prendrait une plus grande ampleur et des différences apparaîtraient plus clairement.

La capacité de rétention de la bande enherbée a été calculée de la manière suivante :

$$CapRet = \frac{cumul\ entrees - sorties}{cumul\ entrees} * 100 \quad (3.1)$$

Avec "cumul entrées" et "cumul sorties" les cumul sur le temps des volumes d'eau en m^3 qui sont entrées et sorties du modèle.

Sur cette variable, les différences sont plus nettes : les simulations sans conditionnement (cas 1 et 2) sont plus hétérogènes que les conditionnées (cas 3 et 4). Les capacités de rétention varient entre 40% et 100% : de grandes différences qui joueront sans doute beaucoup sur le transfert des pesticides. Les tendances de courbes sont identiques : une baisse important de la capacité de rétention dans les premières 40 minutes (pendant l'injection d'eau dans le domaine), puis la capacité de rétention stagne.

Il est intéressant de remarquer que l'apparente stabilité des simulations, comme dans les cas 2 et 3 ne correspond pas à des taux de convergence élevé, au contraire pour ces cas les taux de convergences sont

respectivement 0.2 et 0.3 (voir tableau 3.7).

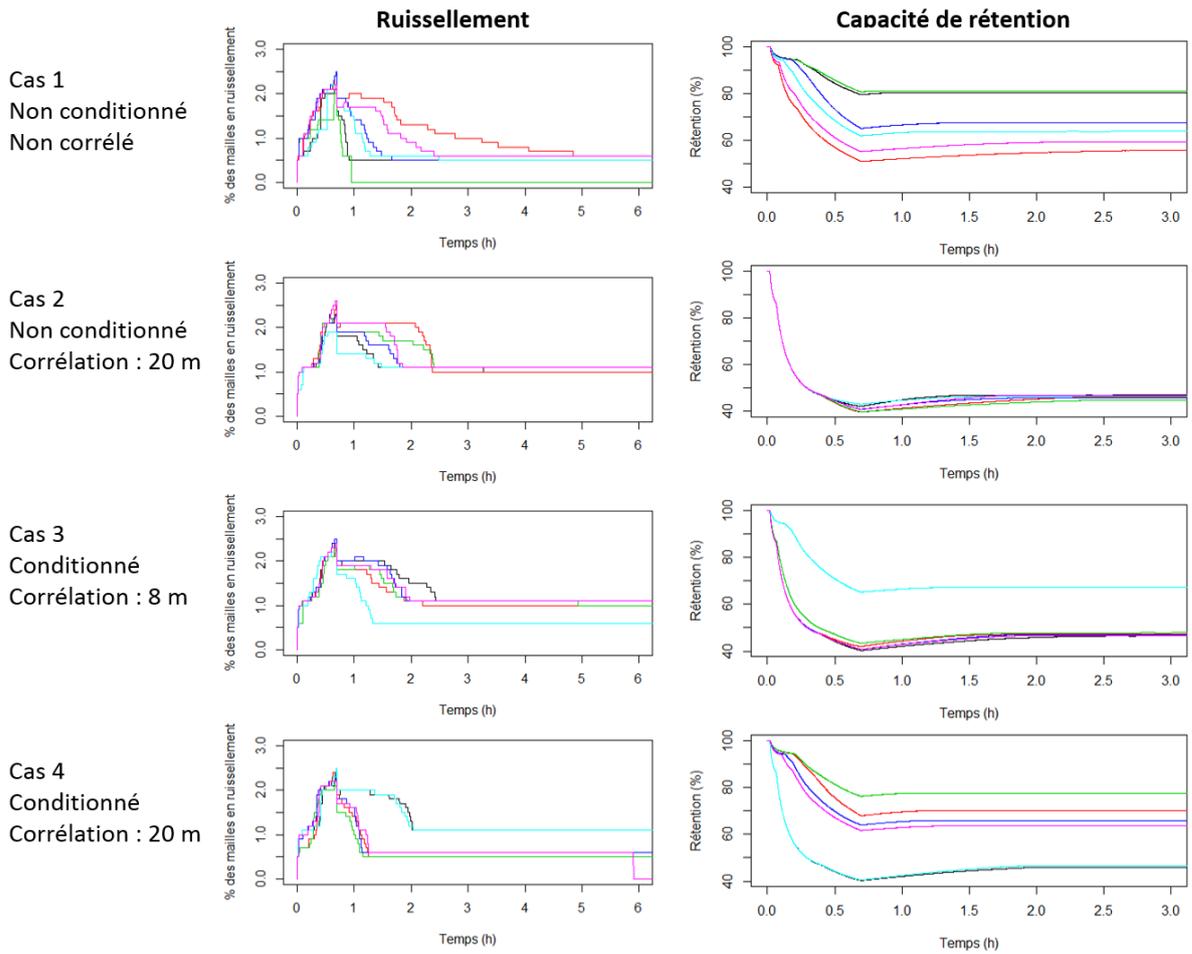


Figure 3.10: Graphiques représentant les résultats de 6 simulations par chacun des 4 cas. A gauche, le ruissellement (% de maille en ruissellement au cours des 6 premières heures de la simulation) et à droite la capacité de rétention de la bande enherbée en pourcentage (voir équation 3.1)

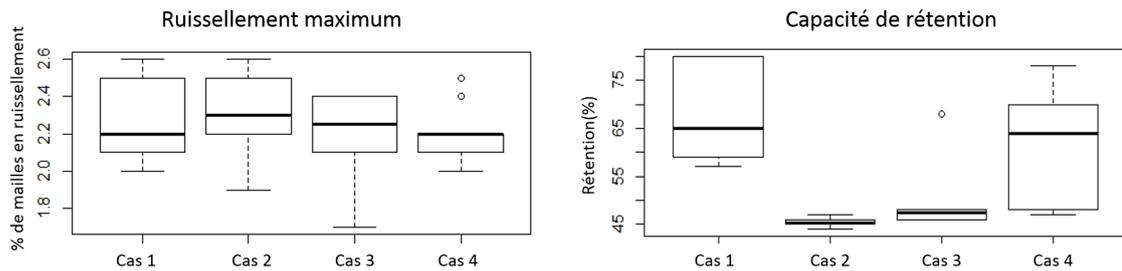


Figure 3.11: Boîtes à moustaches (médiante (trait épais), quartile 0.25 au quartile 0.75, moustaches jusqu'à la valeur distante d'au maximum 1.5 fois la distance interquartile, points extrêmes (ronds)) comparant les résultats obtenus pour chacun des cas concernant le ruissellement et la capacité de rétention après 24h de simulation (pour le cas 4, 11 simulations sont prises en compte contre 6 pour les autres cas)

Circulation en subsurface La circulation en subsurface a été analysée à partir des résultats de cinq points situés à différentes distances en aval de la zone d'injection de l'eau (0.5 m, 1.5 m, 2.5 m, 3.5, et 4.5 m). Les résultats présentés dans le tableau 3.8 portent sur l'observation ou non d'une remontée de la nappe et non d'une quantification de la hauteur de cette remontée.

	total	à x+0.5 m	à x+1.5 m	à x+2.5 m	à x+3.5 m	à x+4.5 m
Cas 1	6/6	6	5	2	2	2
Cas 2	0/6	-	-	-	-	-
Cas 3	1/6	1	1	-	-	-
Cas 4	8/11	8	7	1	-	-

Tableau 3.8: Nombre de simulations pour lesquelles la hauteur de la nappe a été influencée par l'injection d'eau en surface en fonction de la distance par rapport à x (point d'injection) vers l'aval sur lesquels on observe une remontée de la nappe

En ce qui concerne le cas 1, on observe une très bonne circulation de l'eau en subsurface. Pour les cas 2 et 3, on remarque que l'eau n'atteint que rarement la nappe. L'eau injectée s'infiltré dans le sol mais reste dans les horizons 1 et 2 : le transfert vertical est moins important que les transferts latéraux dans ces cas.

3.2.4 Résultats de la simulation basée sur les champs générés avec la loi de gauss

La troncature des champs pour toutes les valeurs négatives ou au dessus du seuil de $10^{-3} m.s^{-1}$ a modifié la distribution des champs. On peut bien observer sur le graphe C.1 annexe C que la troncature des valeurs négatives change la forme de la courbe de distribution des valeurs de conductivité. La troncature modifie à la fois la loi, la moyenne et l'écart-type de l'échantillon.

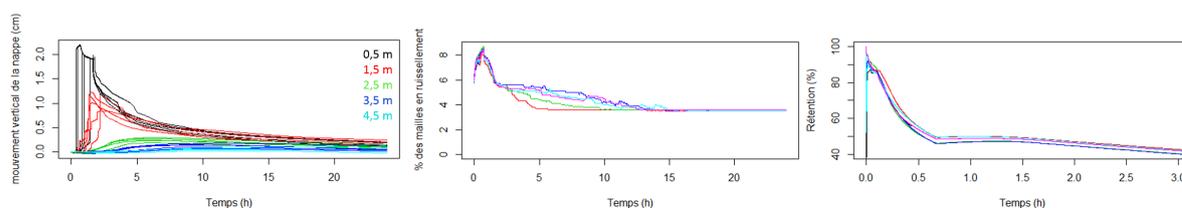


Figure 3.12: Bilan de la simulation avec des champs générés par la loi de Gauss en terme de mouvement de la nappe en subsurface (voir explications plus détaillées au paragraphe précédent), ruissellement et capacité de rétention du sol.

Le graphe de gauche sur la figure 3.12 est liée à la circulation en subsurface : il s'agit du mouvement vertical de la nappe à des points en aval de la zone d'injection d'eau (0.5 m, 1.5 m, 2.5 m, 3.5 m et 4.5 m). Ici par exemple on observe que à 2,5 m en aval du point d'injection, la nappe commence à remonter environ 3.5 h après le début de la simulation.

De manière globale, on peut observer que les résultats sont bien plus réguliers et uniformes que dans les cas de simulation avec des champs générés par une loi lognormale.

Partie 4

Conclusions et perspectives

4.1 Synthèse

L'étude porte exclusivement sur les écoulements d'eau en surface et subsurface d'une bande enherbée, sachant que les transferts de produits phytosanitaires y sont étroitement liés. Le domaine modélisé avec CATHY a été construit en tentant de se rapprocher au mieux des conditions expérimentales des expériences de Boivin afin de s'assurer du comportement réel du domaine. Les conséquences des choix effectués en terme de maillage, conditions aux limites, rugosité et structure du sol ont été testés et les résultats confirment que la conductivité hydraulique est un paramètre d'influence majeure relativement aux autres.

L'étude menée sur un domaine dont la répartition de la conductivité est uniforme ou uniforme par horizon a permis de constater que la paramétrisation actuelle du modèle n'était pas capable de représenter correctement les expérimentations terrain, du moins en terme de dynamique surface-subsurface. Cette constatation permet d'avoir une idée du niveau de précision nécessaire pour représenter les cas réels : ici la paramétrisation est trop simple, la micro-topographie par exemple n'a pas été prise en compte.

En considérant des champs de conductivité hétérogènes différenciés selon le conditionnement et la longueur de corrélation des valeurs de K , on trouve des résultats cohérents et peu hétérogènes en ce qui concerne le ruissellement. Toutefois, on peut prendre ce résultat avec précaution, puisque le ruissellement étant de petite ampleur (moins de 3% des mailles touchées), il est possible que des différences plus claires apparaîtraient si un volume supérieur d'eau était injecté dans le modèle.

Concernant la circulation de l'eau en subsurface, les flux sont très différents selon les cas. On remarque surtout une différence entre la simulation qui n'intègre pas d'auto-corrélation aux valeurs de conductivité hydraulique, et celles qui en intègrent. Dans ces dernières, la circulation latérale de l'eau est privilégiée par rapport à la circulation verticale, à tel point que l'eau n'arrive que rarement à la nappe en 24h.

4.2 Perspectives à court terme

Des perspectives à court terme sont envisageables pour consolider l'étude. Tout d'abord il serait important d'améliorer la convergence des simulations avec des champs de conductivité hétérogène, par exemple en assurant une corrélation verticale entre les horizons du sol ou en modifiant les conditions limites aval. Augmenter le nombre de simulations permettrait de déduire des tendances statistiques fiables, tout en restant vigilant quant au coût de calcul que cela nécessiterait. Il est également envisageable de refaire une campagne de mesures terrain de la conductivité pour mieux conditionner les champs.

4.3 Perspectives à long terme

Le modèle CATHY est performant pour l'hydrologie, mais ne prend pas en compte le transport réactif des solutés ni des sédiments. C'est un modèle de recherche, sa structure et ses codes sont visibles et disponibles, et il est donc possible d'ajouter des modules et des fonctionnalités.

Dans le cadre d'un thèse par exemple, il sera envisageable de mettre en place un module capable de modéliser le transfert des solutés en surface et en subsurface, ainsi que leur dégradation selon leur caractéristiques chimiques, puis d'en tester la sensibilité et de le valider grâce à la banque de données terrain que Irstea possède sur les zones tampons enherbées.

Bibliography

- [A,] Bandes enherbées : Faire de ces immobilisations réglementaires un espace dynamique avec un minimum de contrainte. chambre d'agriculture du calvados (2009).
- [COR,] Produits phytosanitaires et dispositifs enherbes juillet 1997. corpen.
- [Boivin, 2007] Boivin, A. (2007). Pesticide leaching potential through the soil of a buffer strip in the river morcille catchment (beaujolais).
- [Camporese et al., 2010] Camporese, M., Paniconi, C., Putti, M., and Orlandini, S. (2010). Surface-subsurface flow modeling with path-based runoff routing, boundary condition-based coupling, and assimilation of multisource observation data. *Water Resources Research*, 46(2):n/a–n/a.
- [Carluer, 1998] Carluer, N. (1998). *Vers une modélisation hydrologique adaptée à l'évaluation des pollutions diffuses : prise en compte du réseau anthropique*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie.
- [Dagan et al., 1979] Dagan, Gedeon, Bresler, and Eshel (1979). Solute dispersion in unsaturated heterogeneous soil at field scale: I. theory. *Soil Sci. Soc. Am. J.*
- [Druguet, 2012] Druguet, C. (2012). Acquisition de connaissances sur les transferts latéraux d'eau et de solute le long d'un versant viticole. Master's thesis, Université d'Avignon, Master agrosociétés.
- [Gauthier et al., 2009] Gauthier, Camporese, Rivard, Paniconi, and Larocque (2009). A modeling study of heterogeneity and surface water-groundwater interactions in the thomas brook catchment, annapolis valley (nova scotia, canada). *Hydrology and earth system science*.
- [Guay, 2010] Guay, C. (2010). Caractérisation des interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface (havelock, quebec). Master's thesis, INRS.
- [Herbst et al., 2006] Herbst, M., Diekkrüger, B., and Vanderborght, J. (2006). Numerical experiments on the sensitivity of runoff generation to the spatial variation of soil hydraulic properties. *Journal of Hydrology*, 326(1–4):43 – 58.
- [Kollet, 2006] Kollet, M. (2006). Integrated surface-groundwater flow modeling : A free-surface overland flow boundary condition in a parallel groundwater flow model. *Advances in Water Resources*.
- [Kosugia and Ken'ichirou, 1996] Kosugia and Ken'ichirou (1996). Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. *Water Resources Research*.
- [Lacas, 2005] Lacas, J.-G. (2005). *Processus de dissipation des produits phytosanitaires dans les zones tampons enherbées*. PhD thesis, Université de Montpellier 2.
- [Li et al., 2005] Li, Y., LeBoeuf, E. J., Basu, P., and Mahadevan, S. (2005). Stochastic modeling of the permeability of randomly generated porous media. *Advances in Water Resources*, 28(8):835 – 844.
- [Munoz-Carpena et al., 1999] Munoz-Carpena, R., Parsons, J. E., and Gilliam, J. (1999). Modeling hydrology and sediment transport in vegetative filter strips. *Journal of Hydrology*, 214(1–4):111 – 129.
- [Renard and de Marsily, 1997] Renard, P. and de Marsily, G. (1997). Calculating equivalent permeability: a review. *Advances in Water Resources*, 20(5–6):253 – 278.
- [Simunek et al., 1999] Simunek, Sejna, and Genuchten, V. (1999). The hydrus-2d software package for simulating two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media. version 2.0. *IGWMC - TPS - 53*.

- [VandenBogaert, 2011] VandenBogaert, R. (2011). Typologie des sols du bassin versant de la morcille, caractérisation de leurs propriétés hydrauliques et test de fonctions de pedotransfert. Master's thesis, UPCM.
- [Vasquez, 2010] Vasquez, J. (2010). Systemes hydrauliques urbains. In *ENGEES*.
- [Vauclin et al., 1994] Vauclin, Elrick, Thony, Vacahud, Revol, and Ruelle (1994). Hydraulic conductivity measurements of spatial variability of a loamy soil. *Soil Technology*, 7(0):181–195.
- [Zhu and Zhang, 2013] Zhu, H. and Zhang, L. (2013). Characterizing geotechnical anisotropic spatial variations using random field theory. *Canadian Geotechnical Journal*, 50(7):723–734.

Annexes A

Organigramme du centre IRSTEA de Lyon villeurbanne

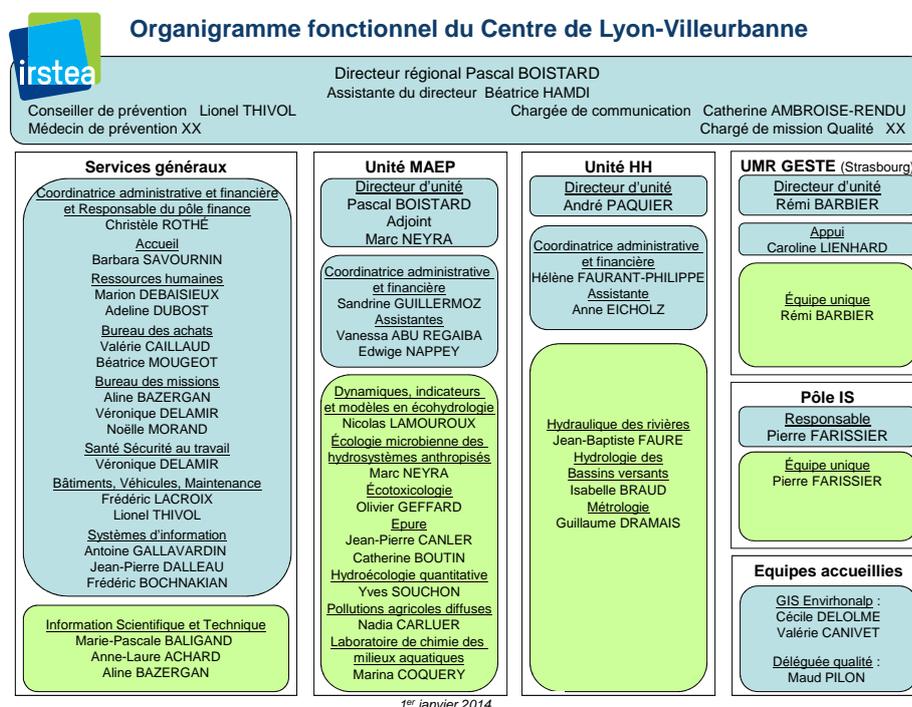


Figure A.1: Organigramme du centre IRSTEA de Lyon villeurbanne

Annexes B

Courbes de rétention et conductivité hydraulique

Les relations entre les caractéristiques hydrodynamiques du sol peuvent être représentées grâce à des fonctions mathématiques. Concernant les courbes de rétention et la conductivité hydraulique, les relations les plus utilisées dans la littérature sont les relations de Van Genuchten et de de Brooks et Corey.

Courbe de rétention : la courbe de rétention (figure B.1) est la relation entre le potentiel matriciel (énergie de liaison entre l'eau et le sol qui augmente avec le dessèchement) et la teneur en eau volumique (équation (??) ci-dessous).

$$\Theta = \frac{1}{1 + (\alpha * \Psi)^n}^m \quad (\text{B.1})$$

Avec Θ la teneur en eau volumique, Ψ le potentiel matriciel et α , n et m des paramètres du sol liés à la hauteur de la frange capillaire pour α et à la distribution granulométrique pour n et m (avec $n = \frac{1}{1-m}$).

Conductivité hydraulique : la conductivité hydraulique (figure B.1) traduit la capacité du sol à transmettre l'eau ((B.2)). C'est le rapport entre le flux d'eau volumique traversant une section donnée et le gradient moteur responsable de cet écoulement : la loi de Darcy généralisée.

$$K(\Theta) = K_s * \sqrt{\Theta} * (1 - (1 - \Theta^{1/m})^m)^2 \quad (\text{B.2})$$

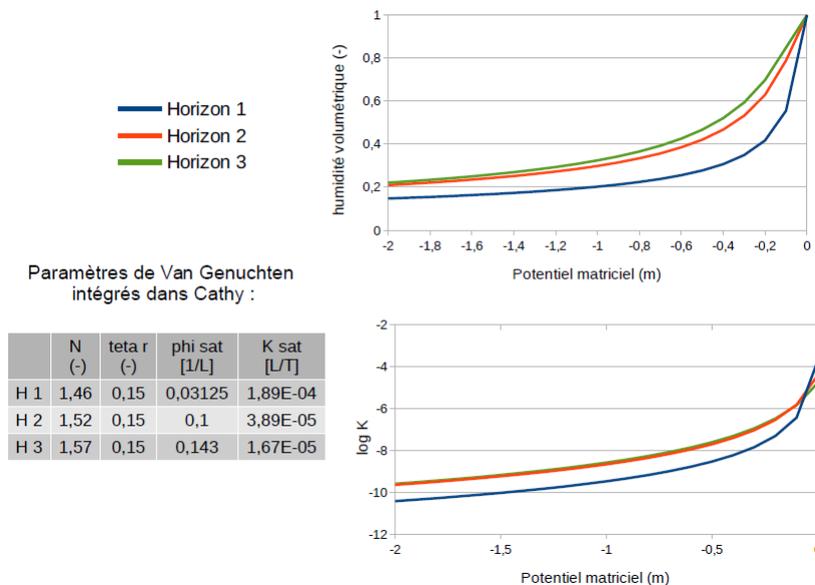


Figure B.1: Courbes de rétention et conductivité hydraulique des trois horizons du sol de la Morcille

Annexes C

Distribution des champs aléatoires générés

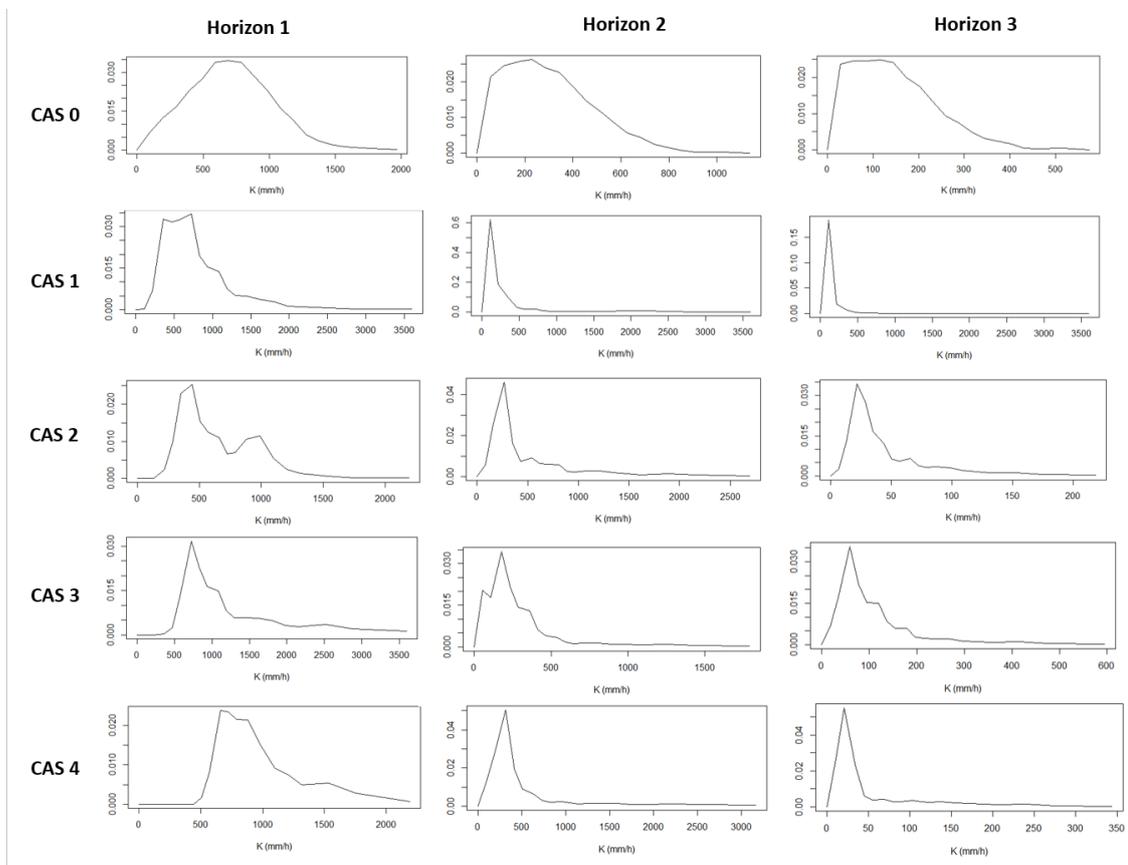


Figure C.1: Distribution des valeurs de conductivité hydraulique dans les champs générés aléatoirement (loi de Gauss dans le cas 0 et loi lognormale dans les autres cas)

Annexes D

Conditionnement des champs

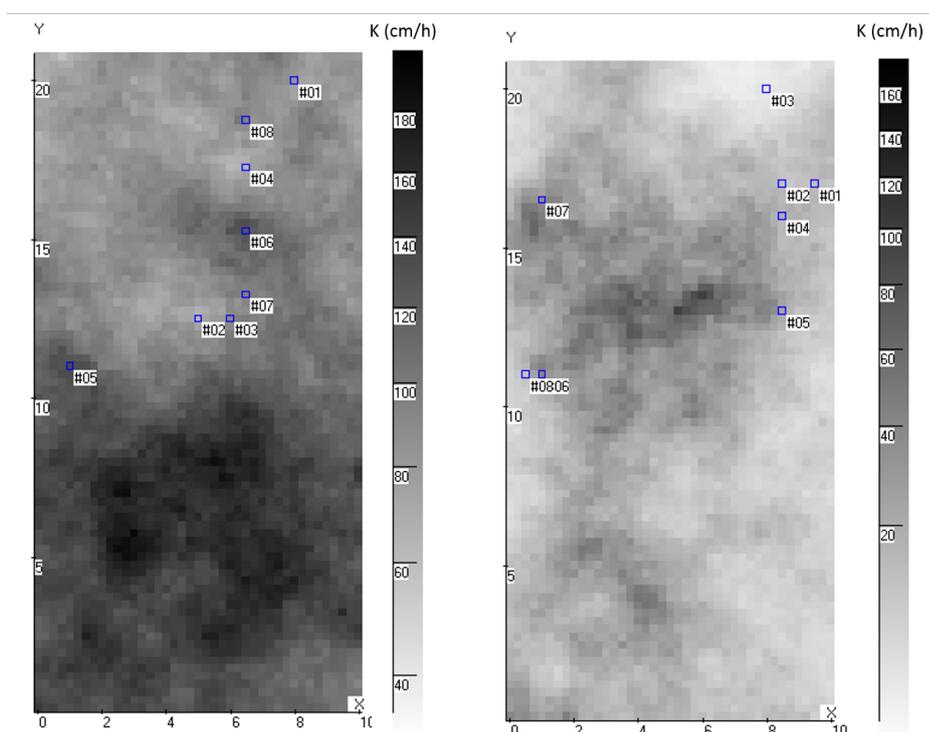


Figure D.1: Exemple de deux champs générés aléatoirement avec les points de conditionnement appliqués (à gauche l'horizon 1 et à droite l'horizon 2)

Numéro du point	01	02	03	04	05	06	07	08
Horizon 1 (K en mm/h)	640	480	700	480	1180	1100	770	750
Horizon 2 (K en mm/h)	110	105	220	180	223	387	330	100

Tableau D.1: Récapitulatif des valeurs de conditionnement sur les deux premiers horizons