



Modélisation du transfert des pesticides à l'échelle de la parcelle. Application au bassin versant de la Fontaine du Theil

M. Corot

► To cite this version:

M. Corot. Modélisation du transfert des pesticides à l'échelle de la parcelle. Application au bassin versant de la Fontaine du Theil. Sciences de l'environnement. 2012. hal-02597328

HAL Id: hal-02597328

<https://hal.inrae.fr/hal-02597328>

Submitted on 15 May 2020

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.

MASTER « *Hydrogéologie, Sol et Environnement* »

Master 1

**Modélisation du transfert des pesticides à
l'échelle de la parcelle. Application au bassin
versant de la Fontaine du Theil.**

Présenté par

Mélodye COROT

Stage réalisé à Irstea (ex. Cemagref)

Tuteur (ou Directeur/Responsable) du stage : Nadia CARLUER

Avant propos

Ce stage s'est déroulé au sein de l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement (Irstea) à Lyon. Irstea (ex. Cemagref) est un organisme de recherche qui, depuis plus de 30 ans, travaille sur les enjeux majeurs d'une agriculture responsable et de l'aménagement durable des territoires, la gestion de l'eau et les risques associés : sécheresse, crues, inondations, l'étude des écosystèmes complexes et de la biodiversité dans leurs interrelations avec les activités humaine. L'AERES (l'agence d'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur) a pour mission d'évaluer les établissements et organismes de recherche en prenant en compte l'ensemble de leurs missions et de leurs activités. Pour Irstea, cette évaluation constitue un instrument de mesure de la qualité et une aide à l'amélioration de l'efficacité. Le centre de Lyon est divisé en trois unités de recherche (annexe 1). J'ai travaillé au sein de l'unité de recherche (MAEP nouvellement appelée MALY) « Milieux aquatiques, écosystème et pollution »

Je tiens tout particulièrement à remercier Nadia Carluer ma responsable de stage qui malgré son travail, les responsabilités qu'elle assume et sa préparation à l'Habilitation à Diriger des Recherches, a su trouver le temps pour m'écouter, me conseiller et me soutenir tout au long de la période de stage. Merci à Romain Dairon pour son aide précieuse et pour un travail d'équipe que j'ai trouvé particulièrement efficace et intéressant. Mes remerciements s'adressent aussi à Bruno Cheviron grâce à qui j'ai pu contribuer au développement de Cemafor, un travail collaboratif enrichissant. Je voudrais aussi remercier Christelle Margoum d'avoir pris le temps de me faire une formation rapide, mais des plus utiles, au logiciel Statgraphics. Enfin, merci à toute l'équipe pollution diffuse pour leur accueil chaleureux et leur sympathie pendant ces cinq mois au sein de l'entreprise.

Un tableau de bord (annexe 2) a été mis en place afin d'organiser au mieux mon travail. Le diagramme (Figure 1) ci-dessous, duquel il découle, permet de voir la répartition du temps de travail pendant ces cinq mois d'expérience professionnelle.

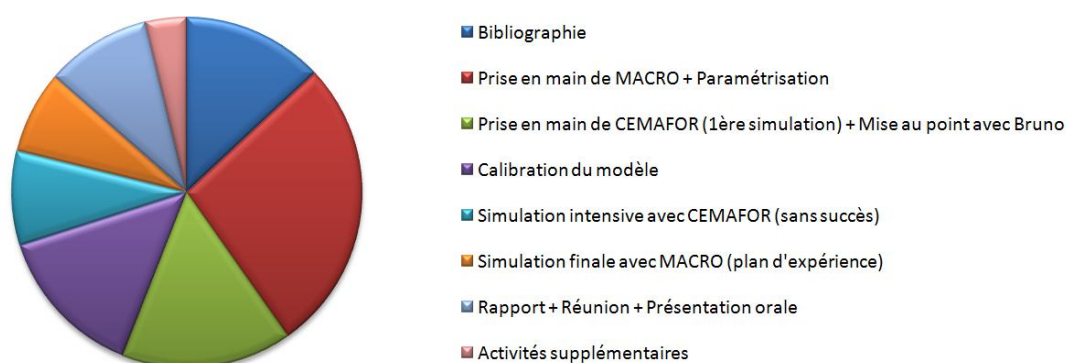


Figure 1 : Diagramme de répartition du temps de travail

Afin de mieux appréhender la modélisation à l'échelle de la parcelle du transfert des pesticides sur le bassin versant de la Fontaine du Theil, le stage a débuté par une étude bibliographique. Puis le modèle MACRO a été pris en main et a été paramétré. La paramétrisation de ce dernier a évolué tout au long du stage. Un fichier « Paramétrisation_MACRO_FdT.doc » a été mis en place afin de garder une trace écrite de la paramétrisation et de son évolution. Par la suite, j'ai

commencé à m'intéresser au fonctionnement de CEMAFOR. Des simulations ont permis de déceler différentes anomalies. Mon travail a donc contribué à l'amélioration de l'outil. Lorsque la simulation du transfert des pesticides a débuté, nous nous inquiétions de ne pas en avoir dans les flux sortants. Nous avons dû prendre une décision, nous avons dû calibrer le modèle à la main afin d'obtenir des flux d'eau et de solutés ruisselés réalistes. Par ailleurs, l'analyse de sensibilité du modèle n'était pas possible sans résultats. Une fois la calibration satisfaisante, la simulation intensive du transfert des pesticides à l'échelle de la parcelle a été entreprise grâce à l'outil CEMAFOR. Cependant, des dysfonctionnements ont perduré et par manque de temps nous avons dû décider d'entreprendre la simulation à la main avec MACRO.

En dehors du travail directement en lien avec mon stage, j'ai aussi pu, lors d'un déplacement sur la Morcille, participer au suivi du traçage sur une bande enherbée. J'ai participé à de nombreux « café biblio » qui permettent de connaître les différents travaux effectués au sein de l'équipe. J'ai aussi pu assister à une soutenance pour une Habilitation à Diriger des Recherches.

Résumé

La réalisation du projet Miriphyque (Appel d'Offre « Evaluation et réduction des risques liés à l'utilisation des pesticides » du Ministère en charge de l'Environnement) nécessite la simulation des flux d'eau et de pesticides à l'échelle de la parcelle et des bassins versants (BV) d'application, la Fontaine du Theil en Bretagne et la Morcille dans le Beaujolais. Dans le cadre de ce stage, j'ai effectué la paramétrisation d'un modèle de simulation du transfert des pesticides à l'échelle de la parcelle (MACRO) en vue d'applications sur le BV de la Fontaine du Theil. Une réflexion sur les stratégies de modélisation a été menée : choix des conditions aux limites, des fonctions de pédotransfert à utiliser pour représenter les caractéristiques hydrodynamiques des sols, influence de la teneur en eau initiale au début de l'année hydrologique. J'ai participé aux tests du logiciel CEMAFOR, couplant MACRO et le logiciel d'analyse de sensibilité PEST, qui permet de réaliser le calage et/ou l'analyse de sensibilité de MACRO de façon intensive. Ce travail en collaboration avec Bruno Cheviron (IRSTEA Montpellier) a permis d'apporter les modifications nécessaires au bon fonctionnement du logiciel CEMAFOR. Cependant, les modifications apportées ont complexifié le codage de l'outil et des dysfonctionnements ont persisté jusque vers la fin du mois d'août. Deux semaines avant la fin du CDD (en prolongement de ce stage), nous avons choisi de faire à la main un nombre réduit de simulations représentatives du fonctionnement de MACRO. L'outil Statgraphics a permis de définir les simulations pertinentes, dans le cadre de différents plans d'expérience, pour analyser la sensibilité du modèle au climat de l'année, à celui de l'année antérieure, au type de sol et à la date de traitement. Les résultats de ces simulations seront stockés dans des entrepôts de données, utilisés ensuite pour agrégation à l'échelle du bassin versant, ce qui est l'une des étapes suivantes du projet Miriphyque.

Abstract

The achievement of the Miriphyque project for evaluation and reduction of risks linked to the use of pesticides (request for proposal from the Ministry in charge of Environment) requires the simulation of water and pesticides fluxes at the plot and catchment scales. Applications take place on the 'Fontaine du Theil' and 'Morcille' catchments, in Brittany and Beaujolais regions, respectively. During this work experience, I have focused on the parameterization of a model that simulates pesticides transfer at the plot scale (MACRO) aiming at future applications on the 'Fontaine du Theil' sites. Reflections on strategies of parameterization involved the choice of relevant bottom boundary conditions, that of pedotransfer functions correctly accounting for hydrodynamic soil properties and assessments of the role played by initial water contents at the beginning of hydrological years. I have contributed to the development and tests of the CEMAFOR tool, coupling MACRO with PEST (a parameter estimation tool) to allow intensive fittings or sensitivity analyses. This work in collaboration with Bruno Cheviron (IRSTEA Montpellier) helped in reaching a stable and reliable version of CEMAFOR, which unfortunately occurred only lately in August. Two weeks before the end of my fixed-term contract (as a follow-up to the work experience) we have chosen to manually perform a selected set of simulations representative of MACRO's behavior. The Statgraphics tool was used to define designs of experiments and identify the number and types of simulations necessary to analyze MACRO's sensitivity to the climate of the present year, that of the preceding year, to soil types or pesticide application dates. Results will be kept in data warehouses for future data aggregation at the catchment scale, which is one of the remaining steps in the Miriphyque project.

Sommaire

Introduction	1
Synthèse bibliographique	2
1. Présentation du modèle de transfert des pesticides : MACRO	2
2. Description de l'outil CEMAFOR	4
I. Le bassin versant de la Fontaine du Theil	5
1.1 Présentation générale	5
1.2 Création de scénarios	5
II. Réflexion sur les modalités de modélisation à adopter et paramétrage de MACRO	8
2.1 Définition de différents profils de sol et détermination de leurs propriétés hydrodynamiques (FPT)	8
2.2 Détermination des conditions aux limites	10
2.2.1 ZHBF : Nappe dans le profil	11
2.2.2 Versant : Gradient hydraulique constant	12
2.3 Estimations des conditions initiales	12
2.4 Paramètres cultureux	13
2.5 Paramètres phytosanitaires	14
2.6 Calibration des paramètres hydrodynamiques	15
III. Modélisation des flux d'eau et transfert de pesticides	17
Conclusion	20
Glossaire	24
Référence bibliographie	22
Liste des Annexes	25
Annexes	26

Liste des figures

Figure 1 : Diagramme de répartition du temps de travail.....	ii
Figure 2 : Courbe de rétention et courbe de conductivité hydraulique	3
Figure 3 : Fonctionnement de Cemafor pour les 2 contextes déjà implémentés	4
Figure 4 : Localisation du bassin versant de la Fontaine du Theil	5
Figure 5 : (a) Carte des sols du bassin versant de la Fontaine du Theil selon la méthode des 4 critères	6
Figure 6 : Conditions aux limites inférieures des profils.....	7
Figure 7 : (a) Infiltration dans les micropores et macropores (b) Percolation micropores et totales obtenues pour les FPT Macro et Footprint pour le sol G1 (2002-2004)	10
Figure 8 : Evolution du stock de soluté en fonction de la profondeur dans le sol G1 - Année 2001 2002	15
Figure 9 : Comparaison entre l'utilisation de conditions initiales estimées (pointillé) et réelles (trait plein) sur la percolation (rose) et le ruissellement (bleu) pour la parcelle G2 pour un climat sec (a) moyen (b) et humide (c).....	19
Figure 10 : Evolution des flux d'eau et de soluté en bas de profil (a) et dans les écoulements de surface (b) en fonction de la pente du profil.....	19

Liste des tableaux

Tableau 1 : Schéma des principaux processus implémentés dans le modèle MACRO (Sürdyk, 2007) ...	4
Tableau 2 : <i>Différents paramètres à combiner lors des simulations</i>	8
Tableau 3: Calcul du bgrad à partir des résultats d'HYDRUS pour le profil de bas fond.....	12
Tableau 4 : Calcul du gradient pour les deux profils de versants.....	12
Tableau 5 : Estimation des teneurs en eau initiale (sèche, moyenne et humide) à partir des paramètres de Van Genuchten	13
Tableau 6: Paramètres culturaux obtenus dans le rapport FOCUS	13
Tableau 7 : Propriété des pesticides (Source PPDB)	14
Tableau 8 : Calibration des bgrad pour les profils de bas fond de la Fontaine du Theil	16
Tableau 9 : Calibration des gradients pour les profils de versant de la Fontaine du Theil	17
Tableau 10 : Dates de traitements choisies pour le plan d'expérience	20

Introduction

Face à l'augmentation de la population mondiale, il est impératif de maintenir des rendements agricoles de bon niveau afin d'assurer la sécurité alimentaire à l'échelle planétaire. Dans ce contexte, il n'apparaît pas réaliste d'envisager la disparition totale des pesticides (produits de protection des cultures) à court ni à moyen terme ; ils ont un rôle à jouer aux côtés de solutions alternatives. Ils sont pourtant l'objet de nombreuses polémiques au sujet de leur impact sur la santé et sur l'environnement. Seules de faibles proportions des quantités appliquées arrivent dans les eaux ; elles peuvent toutefois suffire à provoquer le dépassement des normes de contamination des eaux et pourraient être une des causes majeures de non atteinte du bon état des eaux visé par la Directive Cadre sur l'Eau (DCE, 2000/60/CE). La mise en place de cette directive ainsi que le plan Ecophyto (2008) adopté suite au Grenelle de l'environnement visent une diminution des usages mais la question du transfert des produits phytosanitaires n'a guère été abordée. Le transfert diffus des pesticides vers les milieux aquatiques est un des principaux domaines de compétence de l'équipe pollution diffuse d'Irstea à Lyon, dans laquelle s'est déroulé ce stage. La limitation de la contamination reste toutefois une question complexe de par les nombreux facteurs qui influent sur le devenir des pesticides transportés par voie hydrique. Les propriétés des molécules (aptitude à la fixation et à la dégradation) qui peuvent conduire à de multiples signatures selon le chemin suivi par l'eau, interagissent de surcroît avec de multiples facteurs : les propriétés hydrodynamiques du milieu, le climat, les pratiques agricoles et l'aménagement du territoire. Malgré cette complexité, il semble important d'initier le développement d'outils et méthodes permettant de mieux faire le lien entre les applications de pesticides sur les parcelles et la contamination des différents compartiments. Dans ce contexte et dans le cadre d'un programme du ministère en charge de l'environnement visant à évaluer et réduire les risques liés à l'utilisation de pesticides : le projet MIRIPHYQUE « Mise au point de descripteurs du risque de contamination des eaux de surface par les phytosanitaires à l'échelle du bassin versant. Prise en compte des dimensions spatiales et temporelles. Appui à l'évaluation et à la gestion du risque » a été proposé. L'objectif du projet est d'élaborer une méthode permettant d'analyser le risque de contamination des eaux de surface par les produits phytopharmaceutiques, qui prenne en compte à la fois les dimensions spatiales et temporelles, sans avoir la complexité d'un modèle complet du transfert des pesticides à l'échelle du bassin versant. L'idée principale est d'agréger à l'échelle du BV les résultats issus de la mise en œuvre de modèles de transfert de pesticides à l'échelle parcellaire, et d'intégrer l'influence des éléments du paysage. Le projet s'appuie sur deux petits bassins expérimentaux aux fonctionnements bien différenciés, et sur lesquels on dispose de données depuis plusieurs années : La Fontaine du Theil (Ille et Vilaine) et le bassin de la Morcille (Rhône).

Cette étude s'insère en préalable de ce projet. Elle s'appuie sur la mise en œuvre d'un modèle de transfert des pesticides « MACRO » (Larsbo & Jarvis, 2003, Stenemo & Jarvis 2003) dans différents contextes, pour représenter la diversité des situations que l'on peut trouver sur le petit bassin versant de la Fontaine du Theil, et l'interprétation des résultats en fonction des données d'entrées et paramètres utilisés. Dans cette optique, plusieurs scénarios ont été créés. Les paramètres intervenant dans ces scénarios sont par exemple la position des parcelles dans le bassin versant, ainsi que les calendriers de traitement et les chroniques hydro-météorologiques. Afin d'identifier les paramètres les plus influents dans ce contexte agropédoclimatique, une simulation intensive de ces différents scénarios a été entreprise à l'aide du logiciel CEMAFOR. Ce logiciel couple MACRO avec un logiciel d'analyse de sensibilité PEST, qui permet de réaliser

calage et analyse de sensibilité de MACRO de façon intensive. Il est important de préciser que l'enjeu ici n'est pas de caler le modèle mais d'approcher une simulation réaliste représentative des écoulements sur un petit bassin breton sur schiste.

Le présent rapport débute par une synthèse bibliographique permettant de présenter le modèle de transfert des pesticides utilisé. Puis, il s'organise autour de trois parties :

- Présentation du bassin versant de la Fontaine du Theil
- Réflexion des modalités de modélisation à adopter et paramétrage de MACRO
- Modélisation des flux d'eau et du transfert des pesticides grâce au logiciel CEMAFOR

Synthèse bibliographique

1. Présentation du modèle de transfert des pesticides : MACRO

MACRO 5.2 (Larsbo & Jarvis, 2003, Stenemo & Jarvis 2003) est un modèle déterministe 1D à base physique permettant d'inclure l'effet des macropores. Cet écoulement préférentiel est considéré comme une des composantes majeures intervenant dans le devenir environnemental des pesticides (Surdýk, 2007). Ceci pourrait expliquer l'incapacité de certains modèles, qui ne simulent pas l'écoulement dans ces deux domaines de porosité, à rendre compte des observations. Le modèle MACRO est recommandé par la commission européenne pour le processus d'homologation des pesticides : FOCUS (Forum for the coordination of pesticides fate models and their use). Il est plus particulièrement utilisé comme modèle de référence pour les scénarios de drainage.

1.1 Représentation des écoulements

Dans MACRO, la circulation est séparée entre le transfert matriciel (micropores) et le transfert préférentiel (macropores). Les paramètres hydrodynamiques influant les écoulements sont calculés pour chaque horizon grâce à des fonctions de pédotransfert. Une particularité de la version MACRO 5.2 est de permettre le choix entre deux types de fonction de pédotransfert, une approche initialement utilisée puis celle issue du projet FOOTPRINT (<http://www.eu-footprint.org/fr/>) nouvellement introduite dans MACRO.

Processus de surface : Les phénomènes naturels (pluie, neige) et artificiels (irrigation) sont pris en compte pour le calcul du bilan hydrique. Un fichier des pluies horaires et un fichier contenant l'ETP, les températures minimales et maximales journalières sont implémentés. Lorsqu'un épisode de précipitation survient, une partie est reprise sous forme d'évapotranspiration, calculée par l'équation de Penman-Monteith. Celle-ci est divisée entre l'eau présente à la surface et celle interceptée par la canopée. Une fois dans le sol, l'eau peut soit être évacuée en profondeur (drainage, percolation vers la nappe), soit être absorbée par les cultures. La capacité d'absorption dépendra de la demande évaporative, de la distribution racinaire et de la teneur en eau. L'infiltration est calculée en haut de profil, à chaque pas de temps, en fonction de la conductivité de surface moyenne.

Écoulements dans la matrice du sol et écoulements préférentiels : la porosité totale de chacune des couches est scindée en deux domaines, les micropores et les macropores, chacun étant caractérisé par une cinétique différente. Dans le modèle MACRO, la limite entre ces deux domaines est

caractérisée par une pression capillaire limite (ψ_b^1), elle même liée à la teneur en eau limite (θ_b) et à la conductivité des micropores à saturation (K_b) comme indiqué sur le graphique ci-dessous :

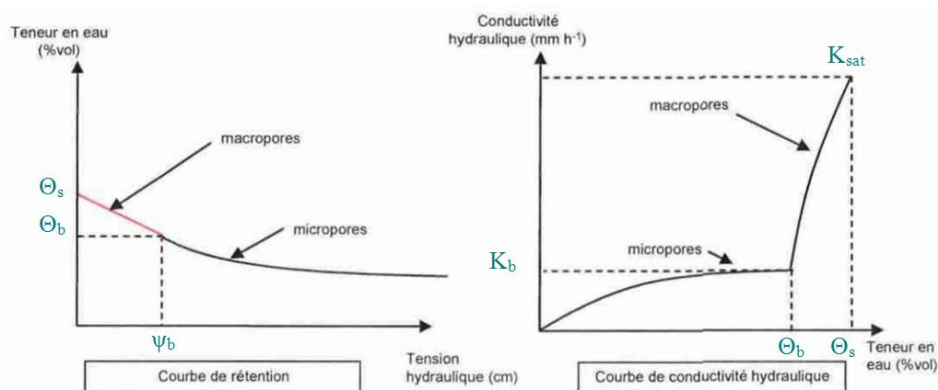


Figure 2 : Courbe de rétention et courbe de conductivité hydraulique

Lorsque les micropores sont saturés, l'eau s'écoule instantanément dans la macroporosité. Le transfert de l'eau dans les micropores est résolu par l'équation de Richards. La courbe de conductivité hydraulique est simulée par le modèle de Mualem, tandis que la courbe de rétention est calculée à partir de l'équation de Van Genuchten. L'écoulement dans les macropores est un écoulement essentiellement gravitaire. L'approche qui décrit les flux dans les macropores équivaut à l'onde cinématique décrite par Germann en 1985.

1.2 Transfert des solutés

Processus de surface : Les pertes de soluté par évapotranspiration ne sont pas prises en compte dans MACRO. La quantité de soluté absorbé par la plante est proportionnelle à la quantité d'évaporation potentielle et à la concentration en pesticides dans la couche de surface.

Écoulements dans la matrice du sol et écoulements préférentiels : MACRO calcule le transport des solutés dans les micropores par l'équation de convection-dispersion. Un terme puits/source permet de représenter l'absorption par les plantes, les pertes par évaporation, drainage et lessivage vers la nappe ainsi que les échanges entre les micropores et les macropores. Un deuxième facteur permet de rendre compte de l'adsorption par le sol. Le flux dans les macropores est calculé par l'équation de convection, la dispersion étant considérée comme nulle. Une homogénéisation s'effectue sur la première couche numérique de sol : la quantité de soluté dans les micropores est fonction de la lame d'eau infiltrée dans la matrice et de la concentration dans la pluie nette (ou dans l'irrigation). Dans les macropores, un équilibre instantané s'effectue entre l'eau entrante et l'eau résidant dans le sol. Les échanges de solutés entre les deux domaines poreux sont basés sur le phénomène de convection-diffusion.

En résumé, le Tableau 1 reprend les principaux processus hydrologiques décrits dans MACRO. La paramétrisation du modèle nécessite l'attribution de valeurs à de nombreux paramètres, qui sont corrélés. En effet, MACRO prend aussi en compte un grand nombre de paramètres relatifs au type de culture, aux pratiques agricoles (labour, drainage...), et aux caractéristiques des molécules. Ceux-ci seront décrits plus précisément dans la partie sur la paramétrisation du modèle

¹ Difficilement calculable par des fonctions de pédotransfert, les valeurs utilisées sont choisies par jugement d'expert en se basant sur des paramétrisations passées sur des sols équivalents à ceux de la Jaillière (Bretagne).

pour ceux que nous avons pris en compte. Les modélisations peuvent se faire à l'échelle journalière ou à un pas de temps plus fin (horaire). Chaque horizon du profil de sol, dont les caractéristiques sont implémentées par l'utilisateur, est divisé en couches numériques (60 à 200 en tout).

	Domaine microporal	Domaine macroporal
Transfert de l'eau	Equation de Richards	Equation d'onde cinétique
Transfert de soluté	Equation de convection-dispersion	Equation de convection
Phénomène d'atténuation	Adsorption/Désorption (instantanée et cinétiques) et Dégradation	Adsorption/Désorption (instantanée) et Dégradation

Tableau 1 : Schéma des principaux processus implémentés dans le modèle MACRO (Sürdyk, 2007)

2. Description de l'outil CEMAFOR

Cemafor (Cheviron, B. 2011) est un outil couplant le modèle hydrologique MACRO et le logiciel d'analyse de sensibilité PEST, qui permet de réaliser calage et analyse de sensibilité de MACRO de façon intensive. Il permet d'effectuer des calculs directs ou inverses sur des contextes déjà créés ou définis par l'utilisateur, impliquant les transferts d'eau et de soluté, sur un profil vertical 1D, comportant 4 couches successives pour des périodes annuelles ou pluri-annuelles. Deux contextes sont déjà implémentés : celui de la Fontaine du Theil et celui de la Jaillière. Dans le deuxième cas, les paramètres de MACRO sont calés en ajustant les prévisions du modèle aux données observées. Toutes les informations disponibles pour toutes les variables ont été implémentées dans le code source de CEMAFOR (Figure 3). Dans le cas de la Fontaine du Theil, au contraire, il n'existe pas de données observées et l'objectif est la réalisation de scénarios. Nous avons vérifié que les résultats obtenus avec Cemafor (utilisant une version ligne de commande de MACRO) sont identiques à ceux qu'on obtiendrait avec l'interface graphique classique de MACRO. Par contre, CEMAFOR présente l'avantage de permettre une simulation intensive de MACRO puisque nous pouvons renseigner en plusieurs lignes successives les différents jeux de paramètres que nous souhaitons tester. Un paramètre de continuité spatio-temporel entre les simulations peut être renseigné à chaque ligne. Il permet de forcer la continuité de la concentration en soluté dans les micropores, de la température et de la teneur en eau totale entre la fin d'une simulation et le début de la suivante.

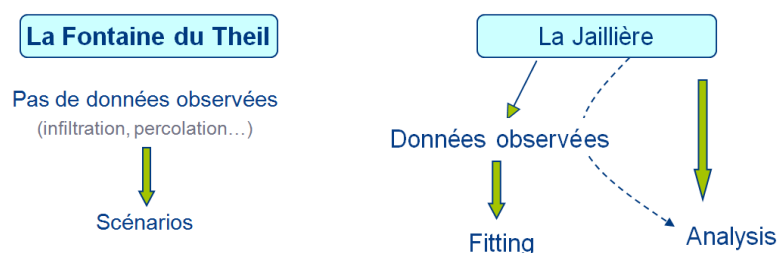


Figure 3 : Fonctionnement de Cemafor pour les 2 contextes déjà implémentés

I. Le bassin versant de la Fontaine du Theil

1.1 Présentation générale

Le bassin versant de la Fontaine du Theil, en contexte agro-pédoclimatique sensible, a été mis en place en 1997, sous l'impulsion de l'UIPP comme site d'expérimentation des techniques correctives proposées par le CORPEN pour limiter la contamination des eaux par les pesticides. Ce bassin a ainsi fait l'objet d'un suivi des pratiques culturales jusqu'en 2006 dans le cadre d'une action pluriannuelle : « Pratiques agricoles durables et qualités des eaux » (Maillet-Merezay et al). Il est situé à une quarantaine de kilomètres au Nord de Rennes, sur la ligne de partage des eaux entre la Bretagne et la Normandie. D'une superficie de 128 hectares, il recouvre l'amont du ruisseau de la Fontaine du Theil sur environ 2 km de long. Il est marqué par une dissymétrie Est-Ouest : les pentes du versant Est sont dans l'ensemble plus fortes (de 5 à 10% en moyenne, localement supérieures à 20%) que celles du versant Ouest (inférieures à 5%) (Branger, 2007).



Figure 4 : Localisation du bassin versant de la Fontaine du Theil

Ce bassin typique des bassins bretons présente des sols homogènes de type limono-argileux qui se développent sur un socle de schistes briovériens peu fracturés. Le climat de la région est de type océanique tempéré, les pluies sont abondantes toute l'année. Sur la période de suivi 1997-2006, la pluviométrie moyenne annuelle est d'environ de 830 mm.

1.2 Création de scénarios

Le modèle définit un cube de sol homogène de 1m² sur 1m20 de profondeur permet de modéliser chaque parcelle. Afin d'identifier les paramètres les plus sensibles dans ce contexte agropédoclimatique du point de vue du bilan d'eau et transfert de soluté, différents jeux de paramètres intervenants dans la construction des scénarios ont été définis :

➤ **Position sur le versant et développement de profil associé**

Une étude pédologique a permis d'élaborer la carte des sols du site (Montagne 1998) selon la méthode 4 critères adaptée au bassin armoricain (Figure 5a). Les critères retenus pour la description des sols bretons sont : le matériau géologique, l'hydromorphie, le type de développement de profil et la profondeur de sol. Les sols ont été regroupés en 3 groupes fonctionnels (G1, G2 et G3) en

fonction des analyses de sols réalisées lors d'une campagne de terrain en mai 2010 (Fabre, M.F. 2011a) et en se basant sur l'expertise acquise par l'UMR SAS² de l'INRA de Rennes sur le comportement hydrologique de ce type de sol. Un quatrième profil (G3 bis) vraiment tranché, mais peu représenté sur le BV avait été gardé dans un premier temps pour représenter le comportement de sol hydromorphe. Mais les conditions aux limites imposées sur G3 suffisait à cet effet, nous n'utiliserons donc pas le sol G3 bis.

En résumé, les 4 profils de sols représentés en Figure 5b ont été développés selon leur localisation sur le versant et leur hydromorphie (annexe 3). Nous pouvons avoir 3 sous-profil selon l'occupation du sol (parcelle cultivée ou en prairie) :

		labouré	tcs ³	Prairie
G1	Sol brun de versant	La/S/C versant	La_A/S/C versant	A/S/C versant
G2	Sol brun lessivé de versant	La/E/Bt versant		A/E/Bt versant
G3	Sol brun hydromorphe de bas fond	La/S/C bas fond	La_A/S/C bas fond	A/S/C bas fond

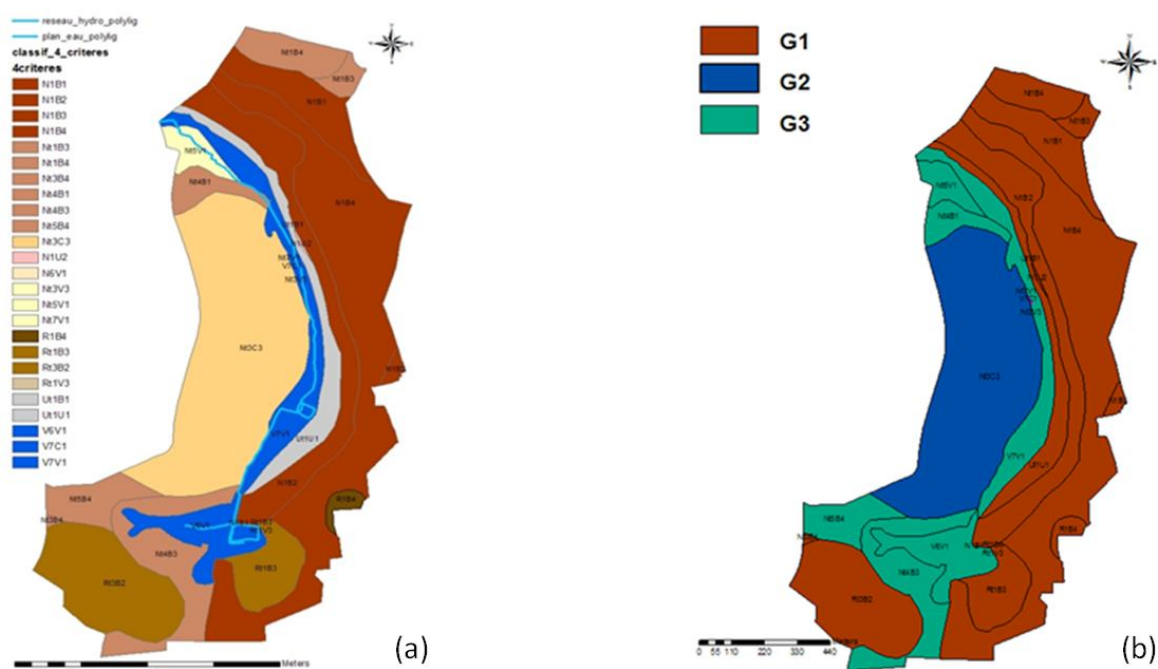


Figure 5 : (a) Carte des sols du bassin versant de la Fontaine du Theil selon la méthode des 4 critères
(b) Mise en place des profils de sols G1, G2, G3 et G3bis

➤ Conditions aux limites à la base du profil de sol

Le substrat peu perméable du BV est généralement de faible profondeur, ce qui permet l'accumulation de l'eau tombée sur le versant et ainsi la constitution d'une nappe présente continuellement sur l'ensemble du bassin versant. Compte tenu du transect piezométrique (Fabre, M.F. 2011b), les bas fonds présentent une nappe dans le profil contrairement aux parcelles situées

² SAS : Sol agro-hydrosystème

³ tcs : Technique cultural simplifiée

sur les versants comme illustré en Figure 6. Nous imposerons donc une condition de nappe dans le profil pour les parcelles en zones hydromorphes de bas fond (ZHBF). Pour les profils de versant nous déterminerons un gradient hydraulique constant.

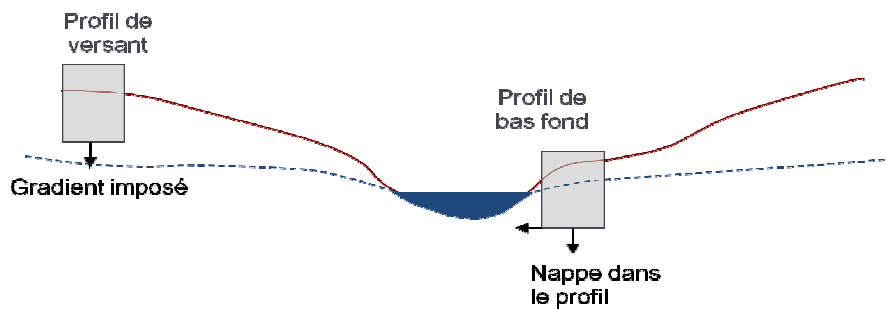


Figure 6 : Conditions aux limites inférieures des profils

➤ Condition initiales : Années plus ou moins sèches

Un premier round de simulations nous permettra de définir, une année type humide, moyenne ou sèche. Nous pourrons alors voir la sensibilité du modèle à l'état hydrique du sol de l'année de traitement ainsi que de l'année antérieure au traitement ou même de l'interaction des 2 (deux années humides qui se suivent).

➤ Pente des Zones Hydromorphes de Bas Fond (ZHBF)

MACRO n'est pas fait pour rendre compte de l'influence de la pente. De plus, il ne représente pas le ruissellement, mais nous avons souhaité tester ce paramètre dans les profils de bas fond où l'écoulement est plus important que le ruissellement. La pente de la nappe dans les ZHBF est sans doute un facteur influant sur le transfert de soluté. N'ayant pas directement accès à ce paramètre dans MACRO, les percolations correspondantes à des pentes moyennes de 0, 4 et 10% avaient été préalablement simulées à l'aide du logiciel HYDRUS :

- 2 mm/jour pour une pente nulle
- 6 mm/jour pour une pente de 4 %
- 12 mm/jour pour une pente de 10%

Nous ajusterons dans MACRO le paramètre (bgrad) qui contrôle les entrées/sorties du domaine afin que les percolations soient celles calculées par HYDRUS.

➤ Date et stratégie de traitement

Les cultures les plus représentées sont les céréales à paille, le maïs et les prairies temporaires. Sur ce bassin modèle plusieurs types d'action ont été menés : du diagnostic réalisé au siège d'exploitation, aménagement de bande enherbée ou de talus, ou encore modification des date/dose de traitements. Pour ce dernier point, le calendrier cultural, qui recense l'ensemble des interventions culturales réalisées sur le bassin pendant 10 ans, fournit les données nécessaires pour étudier la sensibilité aux scénarios de traitements utilisés.

En définitive, une simulation intensive du transfert des pesticides vers les eaux de surface sera entreprise pour un grand nombre de scénarios en combinant les modalités pour les différents types de paramètres (Tableau 2). Par exemple, nous pouvons tester le sol G2 une année humide, avec une année antérieure sèche et un traitement des cultures en post levée précoce.

	Sol. → Conditions aux limites	Types d'année (climat)	Type d'année antérieure	Scénario de traitement
G1	Sol brun de versant → Gradient imposé	Humide	Humide	Pré levée
G2	Sol brun lessivé de versant → Gradient imposé	Moyen	Moyen	Post levée précoce
G3 ou G3bis	Sol brun hydromorphe (lessivé) de bas fond → Nappe dans le profil	Sec	Sec	Post levée tardive

Tableau 2 : Différents paramètres à combiner lors des simulations

II. Réflexion sur les modalités de modélisation à adopter et paramétrage de MACRO

Le recours à une modélisation à base physique afin d'évaluer le risque de transfert de pesticide sur un site donné implique d'être capable de décrire au mieux les écoulements dans le sol. Cette partie présente donc la paramétrisation « complète » du modèle MACRO, avec de nombreuses simulations permettant de mieux comprendre le fonctionnement de ce dernier. Les principaux paramètres utilisés dans ce rapport sont décrits en annexe 4.

2.1 Définition de différents profils de sol et détermination de leurs propriétés hydrodynamiques (FPT)

En raison de la difficulté d'accès à certains paramètres décrivant un sol (mesures généralement destructives, fiabilité et répétabilité de l'expérimentation, coût de la mesure en elle-même), il est parfois nécessaire de se baser sur des valeurs estimées sur un bassin versant similaire à celui étudié, ou bien d'estimer certains paramètres à partir de variables plus facilement accessibles telles que la granulométrie, la teneur en matière organique, ou encore la densité apparente à l'aide de fonctions de pédo-transfert validées. Plusieurs possibilités pour le calcul des propriétés hydrodynamiques du sol dans MACRO : un ensemble de fonction de pédotransfert (FPT) initialement utilisé et un nouvellement introduit dans MACRO 5.2 nommé respectivement « Macro » et « Footprint », les données peuvent aussi être rentrées à la main. Comme son nom l'indique ce dernier est issu du projet Européen Footprint. Des analyses comparatives de Macro et Footprint s'avèrent donc nécessaire afin de juger laquelle est la plus adaptée à dans notre cas d'étude. Au préalable, les différents profils de sols ont été repris à partir des données récoltées sur le terrain. Les campagnes de mesures ont permis de définir les textures des profils de sol, leur densité apparente et

leur teneur en carbone organique repris en annexe 5. La variabilité des caractéristiques hydrodynamiques mesurées sur le terrain (conductivité hydraulique notamment), acquises nécessairement de manière ponctuelle, est importante à l'échelle de l'unité cartographique de sol. De plus, ces données n'ont pu être acquises pour tous les horizons pédologiques : nous choisissons donc d'utiliser des fonctions de pédotransfert, afin d'aboutir à un jeu de propriétés hydrodynamiques cohérent.

Les différentes méthodes pour estimer les paramètres liés au transfert préférentiel sont décrites en annexe 6. Footprint est un outil supplémentaire pour l'estimation de certains paramètres contrôlant l'hydrologie des sols étudiés. De plus, n'ayant pas de données précises sur la structure des sols du BV de la Fontaine du Theil, nous pensons qu'il est préférable d'utiliser les fonctions de pédotransfert Footprint qui nous permettent de ne pas les renseigner directement.

Analyse comparative des fonctions de pédotransfert MACRO et FOOTPRINT :

Les fonctions de pédotransfert Macro et Footprint ont été confrontées pour les sols La/S/C, A/E/Bt de versant et pour un profil type argilo sableux (annexe 7). Nous pouvons voir que Macro présente des teneurs en eau à saturation (totale) légèrement plus élevée pour chaque horizon, et donc une porosité de macropores plus grande. Concernant les conductivités hydrauliques totales, elles sont nettement plus faibles avec l'option Footprint. Les paramètres de diffusion (ASCALE⁴) et de tortuosité (ZN) semblent être évalués complètement différemment entre Macro et Footprint.

Les propriétés hydrodynamiques du sol dépendent fortement des données structurales de celui-ci. Il est nécessaire de renseigner dans le modèle les paramètres de forme (SHAPE) de structure (STRUCTURE) et de taille (STRENGTH) des agrégats. Pour cela, ceux-ci avaient été déterminés approximativement puisque aucune donnée structurale n'avait été relevée sur les sols de la Fontaine du Theil. Nous avons donc testé l'influence de ces paramètres avec chacune des fonctions de pédotransfert (annexe 8). Les propriétés hydrodynamiques obtenues avec Footprint ne sont effectivement aucunement influencées par ces 3 paramètres. Les résultats avec les FPT Macro montrent que lorsque l'agrégat a une structure grossière et a une forme prismatique, la diffusion des micropores vers les macropores est légèrement augmentée. D'autre part, il en va de même lorsque l'on augmente la taille des agrégats mais ceci entraîne de surcroît une importante augmentation de conductivité hydraulique totale.

Des simulations pour évaluer l'influence des fonctions de pédotransfert sur les variables de sorties ont été faites. Nous pouvons voir que l'infiltration à la surface par les micropores obtenue avec les fonctions de pédotransfert nouvellement introduite est moins importante que celle obtenue avec les fonctions de base, contrairement à l'infiltration par les macropores qui est plus importante (Figure 7a). L'écoulement en bas de profil passe plus par les macropores avec les FPT Macro, ceci entraîne en conséquent une percolation totale plus importante de 10mm dans notre cas (Figure 7b).

⁴ ASCALE représente une longueur de diffusion effective. Ce paramètre contrôle l'échange d'eau et de soluté des macropores vers les micropores.

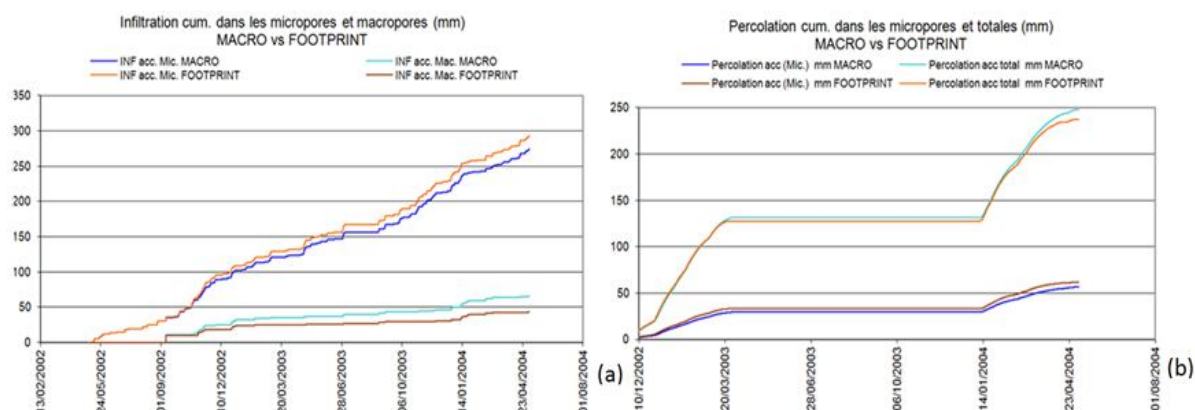


Figure 7 : (a) Infiltration dans les micropores et macropores (b) Percolation micropores et totales obtenues pour les FPT Macro et Footprint pour le sol G1 (2002-2004)

Etude des fonctions de pédotransfert Footprint :

Approfondissons l'étude de ces nouvelles fonctions de pédotransfert. Dans le cadre des pratiques agronomiques, FOOTPRINT permet de prendre en compte le travail du sol qu'il soit conventionnel ou non. Plusieurs options Footprint s'offrent à nous : "Conventionally-tilled", "reduced tilled", "no till" et "perennial". Des tests ont été faits sur les sols La/S/C et A/E/Bt (annexe 9) afin de savoir comment le labour influe sur les propriétés hydrodynamiques. Nous obtenons des paramètres hydrodynamiques identiques entre «Conventionally-tilled», «reduced tilled». En comparaison, «No-till» et «Perennial» présentent une plus forte conductivité à saturation dans les macropores et une plus forte diffusion dans le deuxième horizon seulement. Une culture pérenne entraîne de surcroît une plus importante porosité dans l'horizon de surface. Nous imposerons donc aux parcelles dont les techniques culturales sont simplifiées (tcs) l'option no till afin de pouvoir comparer les différences. Au final, nous choisissons :

- Parcelles cultivée labourée → Conventionally-tilled
- Parcelle cultivée non labourée → No till
- Parcelle non cultivée → Pérenne

Nous remarquons que la version de MACRO 5.1 permettait de donner à titre seulement indicatif un nom aux différents horizons (« La_A », « E », « Bt »...). Dans la version 5.2, la fonction de pédotransfert Footprint utilise ces « noms » pour déterminer les paramètres hydrodynamiques, il est donc nécessaire de les renseigner correctement. Les paramètres hydrodynamiques ont donc été repris en indiquant les noms correspondant à la notation FAO (décrite en annexe 10) :

Désignation Française	La	La_A	A	S	C	E	Bt
Désignation FAO (macro)	Ap	At	A	B	C	E	B

Les propriétés hydrodynamiques obtenues pour chaque profil de sols sont présentées en annexe 11.

2.2 Détermination des conditions aux limites

Les conditions aux limites jouent un rôle primordial dans MACRO et sont donc des sources d'incertitudes majeures du fait de leur hétérogénéité spatiale et temporelle. Les conditions aux limites inférieures sont au nombre de 4 dans MACRO :

1. Une condition de gradient imposé par l'utilisateur
2. Une condition de potentiel de pression qui peut varier dans le temps.
3. Une condition de nappe dans le profil, représentée par un plan de flux nul à la surface de la nappe (remontée capillaire possible) ; et par une percolation en bas de profil défini par :

$$q_{out} = q_{const} \left(\frac{K}{K_s} \right) * H$$

4. Une condition de lysimètre représenté par un gradient unitaire si le sol est saturé à la limite inférieure et une remontée capillaire interdite.

Une description plus précise des différentes conditions aux limites n'a jamais été rencontrée dans la littérature. Seul le guide technique de MACRO permet d'avoir une idée du calcul des flux sortants mais l'existence de différents noms donnés à un même paramètre entre le guide technique et le logiciel ne permet pas d'être sûr des calculs opérés. Rappelons que nous avons choisi d'imposer un gradient hydraulique constant (GHC) pour les profils de versant et une condition de nappe dans le profil (NP) pour ceux de bas fond. Pour commencer, de nombreux tests ont été entrepris afin de mieux comprendre comment se calcule les gradients pour les 2 conditions aux limites qui nous concernent. Pour cela, nous nous sommes focalisés sur les résultats obtenus avec un sol G1 auquel nous avons imposé un gradient de 10^{-4} pour les 2 conditions aux limites. Notons les conductivités de G1 dans l'horizon C :

$$KSM = Kmic = 1.297 \text{ mm/h}$$

$$KSATMIN = Kmac = 5.8 \text{ mm/h}$$

Nous trouvons : (graph)

- GHC : Percolation = $5.83 \times 10^{-4} \text{ mm.h}^{-1}$ (et deux points non expliqués à 0.02 mm.h^{-1})
- NP : Percolation = 0.085 mm.h^{-1}

✚ Concernant, le gradient hydraulique constant, nous remarquons que :

$$\text{Percolation} = \text{grad} * K_{sat(\text{mac})} (\text{horizon C}) = 10^{-4} * 5.8 = 5.8 \times 10^{-4} \text{ mm/h}$$

✚ Pour la nappe dans le profil, nous retrouvons comme indiqué dans le rapport technique :

$$\text{Percolation} = \text{bgrad} (\text{h}^{-1}) * \frac{K}{K_{sat}} * H (\text{mm}) = 10^{-4} * 1 * 850 = 0.85 \text{ mm/h}$$

Le Bgrad est divisé entre les macropores et les micropores comme indiqué ci-dessous. Maintenant que nous sommes fixés sur le calcul des flux sortants. Nous allons alors déterminer les gradients aux limites inférieures pour chacune des conditions aux limites de nos profils.

$$Bgrad_{mic} = brag * \frac{K_{mic}}{K_{mac}} \text{ et } bgrad_{mac} = bgrad * \frac{K_{mac} - K_{mic}}{K_{mac}}$$

2.2.1 ZHBF : Nappe dans le profil

Afin que les résultats soient comparables : nous prenons pour hauteur de profils la hauteur maximale mesurée sur les profils de la Fontaine du Theil soit 1m20. Pour cela, le dernier horizon de chaque profil est modifié. Nous calculons les bgrad pour différents scénarios de pente auxquelles sont associé des percolations précédemment calculé par HYDRUS :

$$\text{Perco (pente 0\%)} = 2\text{mm/j} = 2/24\text{mm/h} = 0,083 \text{ mm/h}$$

$$\text{Perco (pente 4\%)} = 6\text{mm/j} = 6/24 \text{ mm/h} = 0,25 \text{ mm/h}$$

$$\text{Perco (pente 10\%)} = 12\text{mm/j} = 12/24 \text{ mm/h} = 0,5 \text{ mm/h}$$

$$\rightarrow b_{grad} (h-1) = \frac{Perco (mm/h)}{H (mm)}$$

Avec $\frac{K}{K_s} = 1$ et H (lorsque sol entièrement saturé)

	H (mm)	Pente	BGRAD (h-1)
G3	1200	0%	0,000069
		4%	0,00021
		10%	0,00042

Tableau 3: Calcul du bgrad à partir des résultats d'HYDRUS pour le profil de bas fond

2.2.2 Versant : Gradient hydraulique constant

Les flux sortants se calculent donc avec la formule suivante :

$$b_{grad} = \frac{Perco(mm/h)}{K_{mac}(mm/h)}$$

On prend pour percolation la conductivité à saturation des schistes altérés soit 0,72 mm/h (Adamiade, C.-V. 2004). Nous obtenons alors :

		K _{mac} (KSATMIN) horizon C	GRAD (s.u.)
G1	Profil La/S/C versant	5,39 mm/h	0,13
	Profil La_A/S/C versant		
	Profil A/S/C versant		
G2	Profil La/E/Bt versant	4,61 mm/h	0,16
	Profil A/E/Bt versant		

Tableau 4 : Calcul du gradient pour les deux profils de versants

2.3 Estimations des conditions initiales

Les conditions hydriques du sol en début de simulation peuvent être renseignées par l'utilisateur. Les teneurs initiales en eau (THETA_{INI}) permettant de définir le climat du type d'année « antérieur » humide moyen ou sec ont été calculées à partir de θ_{sat} , θ_{res} , α et n obtenus par les FPT Footprint

Pour cela, nous utilisons l'équation de Van Genuchten :

$$S = 1 + (\alpha_{vg} \psi_{vg})^{n_{vg}})^{-m_{vg}}$$

$$\Theta = \Theta_r + (\Theta_s - \Theta_r) * S$$

Nous choisissons un potentiel capillaire pour chaque climat :

Humide : pF = 1,5 ; Moyen : pF = 2,1 ; Sec : pF = 3,5

Les résultats obtenus sont résumés dans le Tableau 5 ci-dessous :

		XMPORV (θ sat)	RESID (θ res)	ALPHA	N	Humide	Moyenne	Sèche
VERSANT	La	47.70%	0%	0.019249	1.27	44%	35%	16%
	La_A	51.08%	0%	0.022695	1.243	46%	38%	18%
	A	40.13%	0%	0.016122	1.239	37%	32%	16%
	S	45.87%	0%	0.024149	1.239	41%	34%	16%
	C	37.63%	0%	0.012072	1.321	35%	29%	11%
	E	43.58%	0%	0.01842	1.266	40%	33%	15%
	Bt	38.12%	0%	0.011406	1.222	36%	32%	17%
BAS FOND	A	48.80%	0%	0.021136	1.257	44%	36%	17%
	S	43.28%	0%	0.018992	1.248	40%	33%	16%
Calculés par Footprint								

Tableau 5 : Estimation des teneurs en eau initiale (sèche, moyenne et humide) à partir des paramètres de Van Genuchten

* Les horizons en gras (A et S) sont les seuls qui diffèrent entre versant et bas fond, ceci est dû au fait que les données texturales sont identiques pour les autres horizons entre versant et ZHBF par manque de données récoltées sur le terrain.

2.4 Paramètres cultureux

Macro offre la possibilité de représenter un sol nu, une culture pérenne ou une culture annuelle (rotation culturales). Les informations concernant les caractéristiques de la culture ont un impact direct sur le bilan en eau à la surface du sol par le biais de leurs surfaces foliaires et de leurs distributions racinaires. Les experts d'Arvalis Institut du végétal ont contribué à la paramétrisation du développement des végétaux dans MACRO.

Les critères de développement des différentes cultures, tels les indices foliaires, le développement racinaire sont issus de la paramétrisation conseillée par le groupe FOCUS (Linders et al. 2003). Nous utilisons le Scénario D5 représentatif de la Jaillière (Bretagne).

	Paramètres propres à l'année				Paramètres propres aux cultures contrôlant la transpiration			
	Date émergence	Date intermédiaire	Date LAI maximum	Date de récolte				
	IDSTART	ZDATEMIN	IDMAX	IHARV	CFORM	DFORM	RPIN	FAWC
Céréale d'hiver	10/11	15/03	15/5	15/7	2	0,2	60%	0.065
Mais	10/5	11/5	15/7	15/9	1,7	0,3	67%	
*Herbe							67%	

Paramètres propres aux cultures contrôlant la transpiration									
					Paramètre LAI			Profondeur des racines	
CRITAIR	BETA	CANCAP	ZALP	ZHMIN	LAIMAX	LAIHARV	LAIMIN	ROOTINIT	ROOTMAX
0,05	0,2	3	1	0.2	6	2	1	0.2	0.9
0,05	0,2	3	1,5	0.01	5	2	0.01	0.01	0.7
0,05	0,2	2	1						0.9

Tableau 6: Paramètres cultureux obtenus dans le rapport FOCUS

En cas de culture annuelle, l'utilisateur doit également spécifier les paramètres liés à son développement (date d'émergence, développements intermédiaire et maximal) et aux pratiques culturales (date de récolte). Nous avons cherché la correspondance de chaque stade phénologique en degré jour afin de pouvoir les définir connaissant la date réelle de semis. Cependant, les degrés jour utilisés dans FOCUS pour obtenir les dates dans le Tableau 6 ci-dessus n'ont pas été retrouvés

dans le rapport FOCUS (2001). Nous nous sommes servis de l'année de référence utilisée dans FOCUS (Véronique Gouy, communication personnelle), c'est celle que l'on retrouve dans MACRO lors du téléchargement. Sachant que l'émergence pour le blé est à 150°jour et pour le maïs 100°jour. Nous remontons aux dates de semis utilisées dans FOCUS et pouvons alors déterminer le nombre de degré jour de chaque stade, résumé dans le tableau suivant :

		Semis	IDSTART	ZDATEMIN	IDMAX	IHARV
Blé	date FOCUS	21/10/1987	10/11/87	15/3/88	15/5/88	15/7/88
	jour julien	294	314	75	136	197
Correspondance degré jour (pour le BV de FdT)		0	145.8 – 151.45 150	825.15 – 831.55 830	1347.9 – 1362.6 1350 ou 1360	2164 – 2180.1 2170 ou 2180
Maïs	date FOCUS	24/04/1988	10/5/88	11/5/88	15/7/88	15/9/88
	jour julien	115	131	132	197	259
Correspondance degré jour (pour le BV de FdT)		0	138.35 – 150.4 150	150.4 – 159.1 155	1015.3 – 1030.45 1020 ou 1030	1966 - 1979 1970

Tableau 7 : Date du rapport FOCUS utilisée pour le calcul des degrés jour

*Les degrés jour sont calculés à partir de la date de semis comme le cumul des températures moyennes journalières lorsque celles-ci sont positives pour le blé et lorsque celles-ci sont comprises entre 6°C et 30°C pour le maïs.

Les dates (en jour julien) des différents stades ont donc pu être calculées pour toutes les dates de semis connues. Un tableau récapitulatif du calendrier cultural de la Fontaine du Theil a été créé (annexe 12).

2.5 Paramètres liés aux phytosanitaires

Nous souhaitons étudier le suivi de 5 molécules principales aux caractéristiques différentes. Deux sont utilisées pour le blé d'hiver : isoproturon et ioxynil. Pour le maïs, nous travaillerons avec l'atrazine, le diméthénamide et le sulcotrione. Les propriétés propres à chaque pesticide (Tableau 8) ont été relevées dans la base PPBD (Pesticide Properties DataBase) du projet Footprint. Les coefficients de dégradation ont été repris en renseignant l'inverse de la DT50 au champ. Par manque de données supplémentaires, les coefficients sont alors recalculés pour chaque horizon en fonction de la profondeur et du taux de carbone organique. Nous n'avons pas fait la différence entre la dégradation dans les différentes phases (solides et liquides), ni celle dans les macropores ou micropores. Nous renseignons directement le coefficient de Freunlich. Enfin, nous pouvons obtenir les coefficients de sorption (Z_{kd}) en renseignant le taux de Koc (cm³/g).

	ioxynil	Isoproturon	Sulcotrione	Atrazine	Diméthénamide
DT 50 (typique)	6	12	25	75	13
DT 50 (au champ)	5	23	3,6	29	13
$\frac{1}{DT50_{achamp}}$	0,2	0,043	0,28	0,034	0.077
Koc (cm ³ /g)	303	122	36	174	69
1/n	0,92	0,8	0,839	1,07	0.961

Tableau 8: Propriété des pesticides (Source PPDB)

Les propriétés des pesticides pour chaque profil de sol sont recensées en annexe 13. Dans MACRO, il est nécessaire de passer par l'irrigation pour simuler un traitement, nous choisissons une hauteur d'irrigation de 0.2 mm. Nous calculons alors pour chaque dose réelle connue la

concentration (mg/m³) connaissant la dose (g/ha). Le récapitulatif des dates et délais de traitement ainsi que des doses/concentrations appliquées se trouve en annexe 12.

2.6 Calibration des paramètres hydrodynamiques

Un premier round de simulations sur chacune des parcelles permet de voir que l'écoulement de surface reste nul dans une très grande majorité des cas. Nous remarquons que la majorité de l'eau est perdue par évapotranspiration jusqu'à 600mm d'ETR pour 850 mm de pluie. Ceci est dû aux données d'ETP que nous renseignons, qui sont particulièrement élevées. Nous avons donc comparé avec les données d'EPT acquises sur le site de la Jaillière, situé également dans le grand Ouest (vers Angers). Nous trouvons une différence moyenne de 160 mm entre les 2 sites (annexe 14). L'hétérogénéité spatiale de l'ETP en Bretagne ne devrait pas être si importante, les différentes méthodes de calcul ne peuvent pas non plus expliquer ces différences. Nous utiliserons donc les données d'ETP du site de la Jaillière. Cependant, cela ne permet toujours pas d'avoir un bilan d'eau raisonnable, le ruissellement reste majoritairement nul et l'ETR proche de l'ETP.

D'autre part lorsque l'on simulait le transfert de solutés, le flux en bas de profil ainsi que dans l'écoulement de surface restait nul. Ne comprenant pas ce qu'il advenait des solutés apportés, nous avons simulé le stock de soluté dans le sol à différentes profondeurs. Dans l'exemple ci-dessous (Figure 8) réalisé sur une parcelle G1, une année d'humidité moyenne, nous pouvons voir que l'isoproturon apporté n'atteint pas le fond du profil ni par les macropores ni par les micropores. De plus, ce soluté met plus de 500 heures pour traverser les 30 cm du premier horizon. En revanche le 2^{ème} horizon, lui, est quasi instantanément traversé.

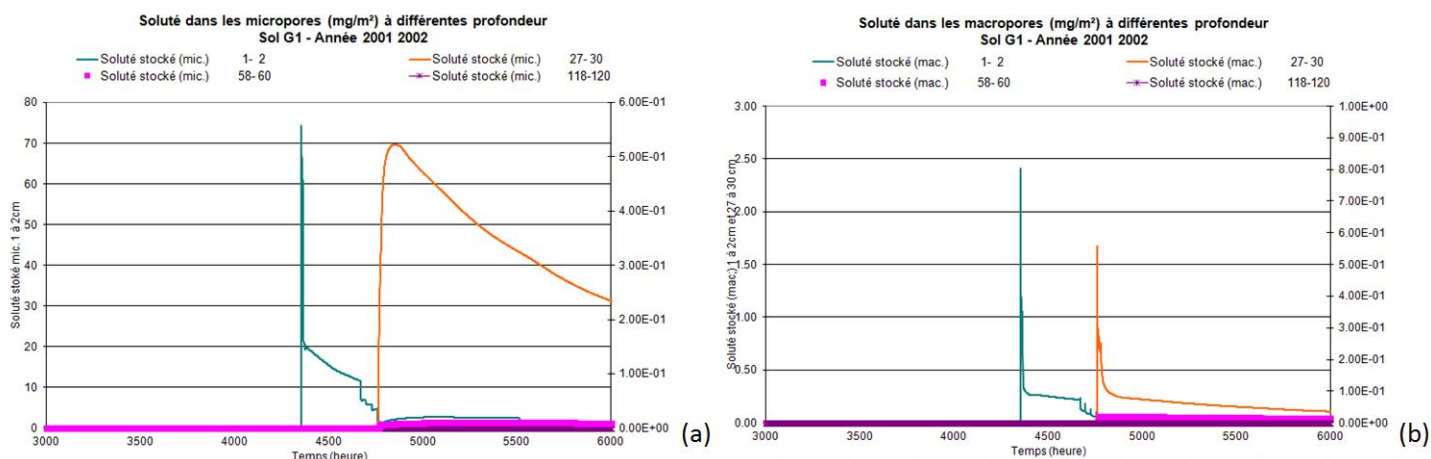


Figure 8 : Evolution du stock de soluté en fonction de la profondeur dans le sol G1 - Année 2001 2002
(à la surface (vert), à la fin du 1^{er} horizon (orange), à la fin du 2^{ème} horizon (rose) et en bas de profil (violet)).

Ce premier round de simulations a permis de voir que les solutés apportés ne dépassaient que très rarement le premier horizon, ce qui ne correspond pas au comportement connu pour cette molécule, relativement mobile. Le transfert de soluté ne semble donc pas être correctement simulé. Une molécule comme l'isoproturon devrait ressortir à 1m20 de profondeur moins d'un an après le traitement. Ces résultats posent tout particulièrement problème, puisque cela ne permet pas de faire une analyse de sensibilité. Rappelons que MACRO est utilisé comme modèle de référence pour l'homologation européenne pour les scénarios de drainage (FOCUS, 2003). Les parcelles de la Fontaine du Theil ne sont pas drainées.

Les gradients contrôlant la percolation en bas de profil est un paramètre empirique. N'ayant pas trouvé d'estimation de ce paramètre dans la littérature, nous avons tenté de le faire varier afin d'obtenir des résultats plus raisonnables : il s'avère toutefois peu sensible pour les caractéristiques hydrodynamiques utilisées.

Nous avons donc du nous résoudre à modifier quelques paramètres issus des fonctions de pédotransfert. En effet, rappelons que le but ici n'est pas d'avoir des simulations qui représentent la réalité mais d'avoir des résultats réalistes afin de voir l'influence des paramètres et de permettre l'agrégation des chroniques simulées. Afin de contraindre le modèle raisonnablement, nous choisissons donc de modifier soit des paramètres empiriques qui ont une influence importante sur le devenir des pesticides, soit des paramètres calculés par les fonctions de pédotransfert dont l'ordre de grandeur peut varier significativement d'un sol à l'autre.

Nous avons commencé par diviser par 10 les conductivités dans les micropores calculées par Footprint afin que le transport se fasse essentiellement par les macropores. Par ailleurs, les longueurs de diffusion issues des FPT Footprint évoluent inversement en fonction de la profondeur, montrant le caractère relativement « subjectif » de ce paramètre : nous avons choisi de la fixer pour chacun des profils de sols à 100, 150 et 50 pour les horizons de la surface vers le fond de profil. La longueur de diffusion est en quelque sorte la « durée » que met la molécule pour retourner des macropores vers les micropores. Des valeurs plus élevées permettent d'éviter le retour de l'eau dans la matrice du sol. Nous avons également imposé le facteur de tortuosité « ZN » correspondant, soit 3, 2 et 3 de la surface vers la profondeur. Enfin, que se soit pour les profils de versant ou de bas fond, les gradients ont été ajustés afin que les flux d'eau et de pesticides soit raisonnables. L'ETR est relativement constante en Bretagne de l'ordre de 300 à 400mm. La nappe fournit 90 à 95% de l'eau qui arrive aux rivières sur l'année (Molénat, J. 2012).

Les propriétés hydrodynamiques qui seront utilisées pour la simulation intensive sont en annexe 14. Les modifications apportées sont en vert.

Calcul des bgrad de bas fond : les percolations calculées par HYDRUS ne donnant pas de résultat réaliste, nous avons du imposé un bgrad de $0.00009h^{-1}$ afin d'avoir un rapport entre percolation et ruissellement réaliste, il sera donc représentatif d'une pente de 4%. Les bgrad des pentes de 0 et 10% seront calculés proportionnellement au rapport donné entre les pentes par Hydrus.

	H (mm)	Pente	BGRAD (h-1)
G3	1200	0%	0.000029
		4%	0.00009
		10%	0.00018

Tableau 9 : Calibration des bgrad pour les profils de bas fond de la Fontaine du Theil

Calcul du gradient des profils de versant : nous trouvons un comportement raisonnable pour les solutés qui nous paraît raisonnable pour un gradient de 0.025 qui représente une percolation de 0.135 mm/h. Les bgrad du profil G2 ont donc été calculés avec ce taux de percolation.

		K _{mac} (KSATMIN) horizon C	GRAD (s.u.)
G1	Profil La/S/C versant	5.39 mm/h	0.025
	Profil La_A/S/C versant		
	Profil A/S/C versant		
G2	Profil La/E/Bt versant	16.61 mm/h	0,008
	Profil A/E/Bt versant	24.61 mm/h	0.005

Tableau 10 : Calibration des gradients pour les profils de versant de la Fontaine du Theil

III. Modélisation des flux d'eau et transfert de pesticides

Les simulations seront faites sur deux années hydrologiques. Cette dernière débute en septembre, elle comporte une phase de recharge jusqu'à peu près février et une phase de vidange de mars à août environ. Pour débiter la simulation intensive avec Cemafor nous voulions réaliser un premier round avec l'ensemble du calendrier cultural réel pour chaque molécule sur chacune des parcelles. Par exemple, pour l'isoproturon les années où ce produit n'est pas épandu (rotation blé_maïs), nous simulons une parcelle de maïs mais sans irrigation (traitement) afin de garder la continuité des concentrations en soluté et des teneurs en eau de l'année précédente et de pouvoir modéliser les exportations d'isoproturon advenant l'année suivant l'application. Les fichiers pour chaque molécule ont été préparés. Cependant, malgré de nombreux essais et modifications apportées au code Cemafor, des problèmes persistaient. Seul, le fichier « Isoproturon » a fonctionné en entier. Nous retrouvons les mêmes résultats avec MACRO « seul », ce qui montre la validité des résultats acquis via le couplage assuré par Cemafor. Cette mise en œuvre a également montré l'efficacité des simulations réalisées par l'intermédiaire de Cemafor, qui permettra, une fois les derniers problèmes résolus, de réaliser l'ensemble des simulations initialement programmé, ainsi qu'une première interprétation des résultats obtenus, de façon rapide. Nous avons donc, pour nous assurer d'avoir des résultats, décidé d'entreprendre les simulations « à la main » avec MACRO. L'ensemble des simulations proposées en début du rapport ne pourra pas être réalisé de façon intensive dans le cas de ce travail.

Pour commencer, le calendrier cultural réel de l'isoproturon A été simulé. Pour chaque traitement, nous simulons l'année du traitement et l'année suivante. Ceci permet de calculer les concentrations moyennes en soluté en bas (eq. 1) de profil et dans le ruissellement (eq. 2) avant et après l'été à partir des flux calculés par MACRO :

$$\text{Concentration moyenne percolée} = \frac{\text{Soluté percolé}}{\text{Lame d'eau écoulée}} \quad (1)$$

$$\text{Concentration moyenne ruisselée} = \frac{\text{Soluté ruisselé}}{\text{Lame d'eau ruisselée}} \quad (2)$$

Nous calculons aussi pour chaque date de traitement, le pourcentage de quantités exportées la première et la deuxième année par rapport aux quantités apportées. L'ensemble des résultats obtenus pour l'isoproturon sont récapitulés en annexe 15. Ces premiers résultats nous permettent de déterminer des années de climat type humide, moyen ou sec en se basant sur les années où les conditions permettent effectivement d'avoir un flux de soluté en sortie. Au final, nous choisissons :

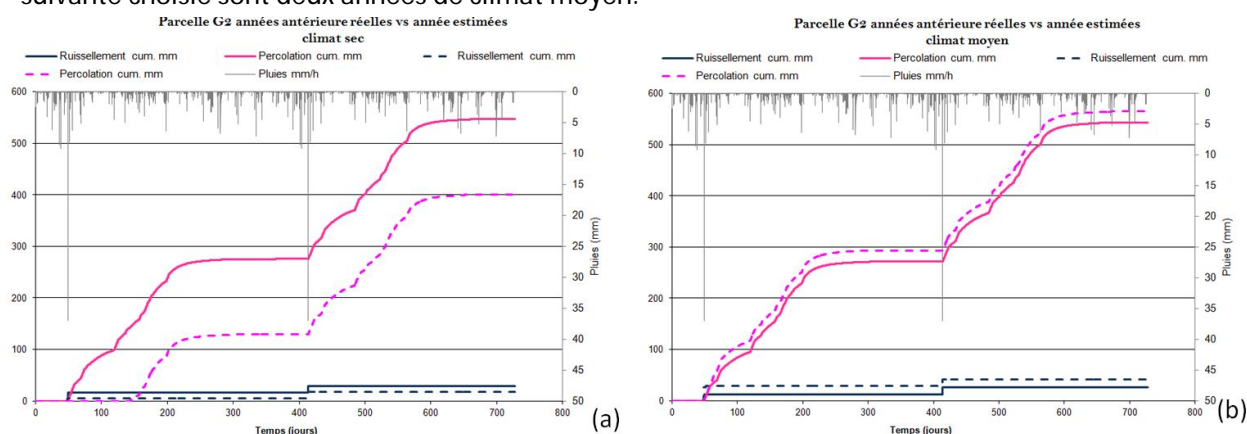
- Année sèche : 1997 - 1998
- Année moyenne : 2001 - 2002
- Année humide : 2000 - 2001

Pour le reste des simulations, nous devons choisir de cibler de manière raisonnée les simulations à faire. Dans cette optique, des plans d'expérience ont été mis en place grâce au logiciel Statgraphics. Le plan d'expérience consiste à définir la série d'essais à mettre en place : au lieu de faire varier un paramètre à la fois, le plan d'expérience permet de faire varier simultanément les différents facteurs de façon organisée. Les graphiques obtenus permettent d'estimer les effets des facteurs et de leur interaction éventuelle.

Un plan d'expérience a été construit pour comparer l'influence de l'année, de l'année antérieure et du type de sol sur la percolation, le ruissellement, l'ETR, et sur le pourcentage de Isoproturon ruisselé et percolé (annexe 16). Le même plan a été fait pour l'atrazine et le sulcotrione, deux pesticides utilisés pour le maïs, le plan permettra donc, en plus, d'étudier l'influence du type de molécules (annexe 17). Pour chacun, nous avons simulé des conditions initiales en simulant l'année précédente. En effet, des analyses de sensibilités réalisées par Dubus et Brown (2002), montrent aussi qu'il est primordial de simuler une année antérieure afin d'obtenir des conditions initiales (teneur en eau, température, concentration) cohérentes. De plus, nous avons choisi des dates de culture et de traitement réelles moyennes. Les résultats des plans d'expérience sont respectivement en annexe 18 et 17. Nous obtenons des graphiques de Pareto qui permettent de connaître l'importance de l'influence des paramètres sur une variable de sortie. Des graphiques permettent de voir l'effet de chacun des paramètres sur les variables de sorties.

Les diagrammes de Pareto permettent de voir que le climat de l'année de traitement est le paramètre le plus influant, suivi en général du type de sol. Au contraire, le climat de l'année précédente ne semble avoir aucun impact sur le bilan d'eau. La percolation et le ruissellement sont plus importants lorsque le type d'année est humide ; au contraire l'ETR y est plus faible. Nous pouvons voir que le ruissellement est plus fort pour les profils de bas fond alors que la percolation est réduite. Enfin, le deuxième plan d'expérience permet aussi de constater que l'interaction entre le type de molécule et l'année influence les flux de soluté. En effet, en regardant le plan d'expérience de plus près, les flux de soluté percolé les plus importants sont pour la sulcotrione une année humide. Nous comprenons donc que l'influence des propriétés des molécules n'est pas négligeable sur la quantité de soluté percolée. En effet, la sulcotrione qui est plus mobile ($K_{oc}=36$) que l'atrazine ($K_{oc}=174$) et a une plus courte demi vie percole en quantité plus importante.

Parallèlement, nous avons comparé les résultats obtenus avec les conditions initiales estimées à partir des paramètres de Van Genuchten (Tableau 5) et des conditions initiales réelles en simulant une année antérieure sèche moyenne ou humide (Figure 9). L'année de traitement et l'année suivante choisie sont deux années de climat moyen.



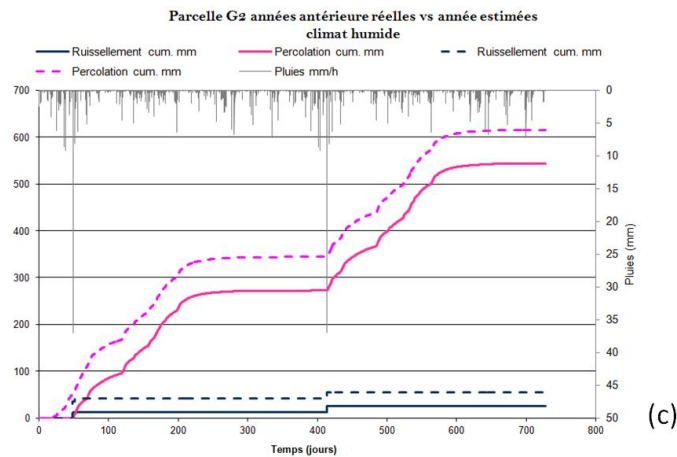


Figure 9 : Comparaison entre l'utilisation de conditions initiales estimées (pointillé) et réelles (trait plein) sur la percolation (rose) et le ruissellement (bleu) pour la parcelle G2 pour un climat sec (a) moyen (b) et humide (c)

Comme les plans d'expérience l'avaient démontré, le bilan hydrique reste quasiment inchangé lorsque l'on simule une année antérieure. En effet, que le climat de l'année antérieure soit sec ou humide, nous trouvons pour une parcelle G2, par exemple, environ 530 mm de percolation et 25 mm de ruissellement. Cependant, en utilisant les conditions initiales estimées (THETA_{INI}) à partir des paramètres de Van Genuchten, le bilan hydrique de l'année peut être fortement influencé. Les teneurs en eau représentatives d'un climat antérieur sec sous estiment de 28% le bilan en eau. Au contraire, les paramètres calculés représentatifs d'une année antérieure humide entraînent une surestimation du bilan d'eau de 13%. Au final, l'estimation que nous faisons des teneurs en eau initiales représentatives d'une année sèche ou humide est imparfaite. Deux solutions sont envisageables : garder une méthode d'évaluation analogue des conditions initiales, en ajustant « le curseur » pour minimiser le décalage constaté ; ou se baser sur l'état hydrique du sol obtenu par le modèle suite à la simulation d'une année typique (sèche ou humide selon le cas).

Nous avons ensuite testé l'influence de la pente des sols de bas fonds sur les flux percolés et ruisselés (Figure 10Figure 2). Nous pouvons voir que la pente a une influence considérable sur le bilan hydrique. Une fois les paramètres hydrodynamiques fixés, le paramètre bgrad devient relativement sensible sur les sorties du modèle. Lorsque l'on simule une pente de 4%, la percolation est doublée et le ruissellement deux fois moins important. Quant à la quantité de soluté percolé, elle est trois fois plus importante. Nous pouvons voir que pour une pente nulle le ruissellement est plus important ceci est du au fait que la nappe affleure puisque l'écoulement surfacique pour des pentes de 4 et 10% n'est pas influencé.

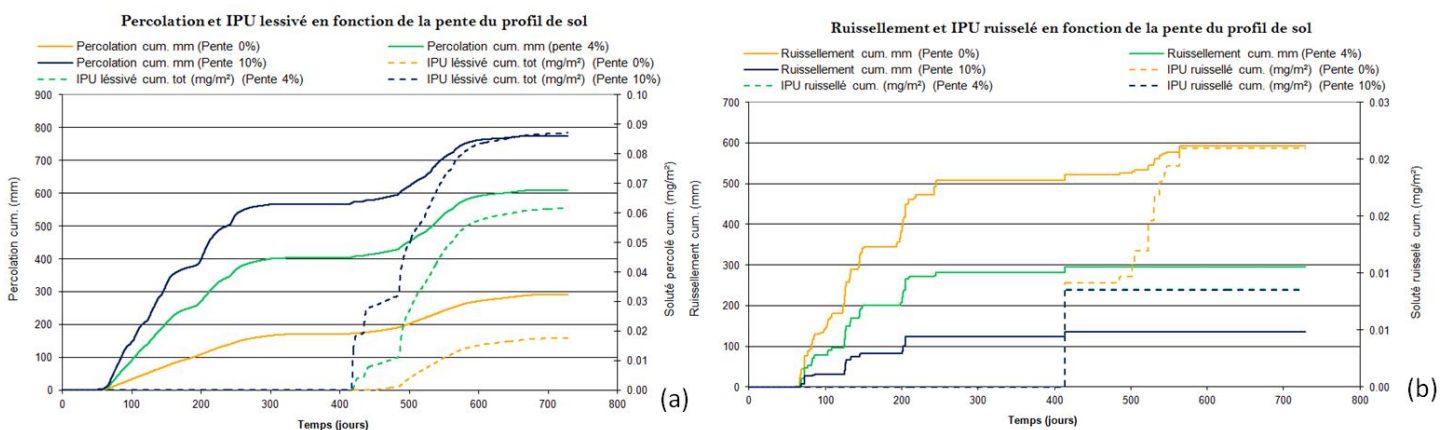


Figure 10 : Evolution des flux d'eau et de soluté en bas de profil (a) et dans les écoulements de surface (b) en fonction de la pente du profil

Enfin, nous souhaitons savoir si la date de traitement a une influence sur les transferts de soluté et nous appuyons à cet effet un plan d'expérience (annexe 20). Il faut définir des quelques dates afin de minimiser le nombre de simulations à effectuer. Nous les choisissons significativement différentes pour voir s'il y a un effet. Un essai est fait sur une parcelle de blé traitée avec de l'isoproturon, nous choisissons 2 dates en pré levée (Tableau 11). Les deux autres dates sont représentatives des dates réelles (post levée tardive). Nous déterminons l'interception par la canopée en nous basant le rapport final de FOCUS. Cependant, les résultats (annexe 21) ne montrent pas d'influence de la date de traitement.

Date de traitement	Jour julien	Interception par la canopée
Date de semis	310 (année n)	0
Date de semis + 10 jours	320 (année n)	0
Date de traitement réelle (post tardif) – 10 jours	43 (année n+1)	0.5
Date de traitement réelle (post tardif)	53 (année n+1)	0.5

Tableau 11 : Dates de traitements choisies pour le plan d'expérience

Ces résultats sont dus aux caractéristiques même de l'année, en effet, nous remarquons que les jours de traitement choisis tombent tous des journées où les précipitations sont nulles. Une simulation intensive comportant différentes dates de traitements plus rapprochées (de -10 à +10 par incrément de 2) permettra de voir l'influence de l'occurrence des pluies.

Conclusion

Pour contribuer au projet Miriphyque qui vise à « caractériser le risque de contamination des eaux par les produits phytosanitaire », nous avons simulé le transfert des pesticides à l'échelle de la parcelle avec le modèle MACRO pour un grand nombre de scénarios agro-pédo-climatiques sur le bassin versant de la Fontaine du Theil (35) : sol, climat, culture, stratégie de traitement. Le modèle a été paramétré puis calibré afin d'obtenir des résultats réalistes. L'objectif était de réaliser une analyse de sensibilité sur différents paramètres et données d'entrée, mais aussi de produire des chroniques simulées nécessaires au déroulement du projet Miriphyque. Compte tenu des dysfonctionnements rencontrés avec CEMAFOR, nous avons réalisé un nombre plus limité de simulations, représentatives de la diversité des situations rencontrées. Les résultats ont permis de mettre en évidence l'importance considérable du climat de l'année sur les variables simulées : débits ruisselés et percolés, quantités de pesticides exportées. A l'inverse, le climat de l'année antérieure semble n'avoir que très peu d'influence dans ce contexte. Il serait intéressant de suivre la même démarche, se basant sur des plans d'expérience, dans un contexte où des mesures sont disponibles pour juger si l'état hydrique du sol de l'année précédente n'a réellement aucun impact sur les flux d'eau percolés et par conséquent sur les transferts de solutés. D'après les simulations, les propriétés des pesticides constituent le deuxième facteur le plus influant sur leur transfert. En effet, une molécule plus mobile est retrouvée en quantité plus importante en bas de profil qu'une molécule s'adsorbant beaucoup. Enfin, les propriétés hydrodynamiques du sol ont aussi une importance non négligeable sur les flux d'eau et de solutés. La méthode utilisée pour estimer les conditions hydriques du profil en début de simulation exagère la dessiccation ou la saturation du sol par rapport aux

profils simulés par MACRO, et mériterait d'être ajustée. En s'appuyant sur le calendrier cultural exhaustif existant sur le BV, l'influence d'utiliser des dates de traitement réelles ou approximées a été étudiée.

De façon générale, ces résultats, bien que s'appuyant sur des plans d'expérience, sont basés sur un nombre relativement limité de simulations : la mise en œuvre de CEMAFOR, maintenant les derniers problèmes résolus, permettra de conforter et généraliser ces conclusions, ainsi que d'alimenter les entrepôts de données, qui seront remobilisés dans la suite de Miriphyque.

En définitive, ce stage m'a permis d'acquérir une connaissance fine de MACRO dans un contexte non drainé alors que la littérature existante concerne surtout des contextes drainés. Grâce à ce travail, j'ai pu acquérir des connaissances sur les transferts de pesticides dans l'environnement. Cette expérience en modélisation me permettra surtout de mieux appréhender, lors d'une future expérience professionnelle en bureau d'études, l'analyse des résultats de simulations.

Références bibliographiques

ADAMIADÉ, C.-V. (2004) *Influence d'un fossé sur les écoulements rapides au sein d'un versant. Application au transfert des produits phytosanitaires*, université Pierre et Marie Curie, 239 p.

ANDREU, A., MORENO, F., JARVIS, N.J. et VACHAUD, G. (1994) *Application of the model MACRO to water movement and salt leaching in drained and irrigated marsh soils, Marismas, Spain*. Agricultural water management 71-88

BRANGER, F. (2007) *Utilisation d'une plate-forme de modélisation environnementale pour représenter le rôle d'aménagements hydro-agricoles sur les flux d'eau et de pesticides. Application au bassin versant de la Fontaine du Theil*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier. 220 p.

CARLUER, N. (1998) *Vers une modélisation hydrologique adaptée à l'évaluation des pollutions diffuses : prise en compte du réseau anthropique, application au bassin versant du Naizin (Morbihan)*. Thèse de doctorat, Université de Paris VI. 1-64

CARLUER, N. (2009) *Evaluation et réduction des risques liés à l'utilisation des pesticides*. Projet MIRIPHYQUE 29 p.

CARRIER, X. (2004) *Modélisation du transfert de produits phytosanitaires en parcelles agricoles drainées dans l'Ouest de la France : aide au diagnostic pour les risques de pollution vers les eaux de surfaces*. Rapport de fin d'étude. 142 p.

CHEVIRON, B. (2011) *Tutorial of CEMAFOR: Controlling solute movements with Cemafor*. 73 p.

DUBUS, I.G. et BROWN, C.D. (2002) *Sensitivity and uncertainty analyses for macro*. J Environ. Qual. 31:227-240

DUBUS, I.G. et al. (2002) *Uncertainty and probabilistic approaches to pesticide fate modelling*. Report to the department for Environment. 140 p.

DUBUS, I.G. et al. (2008) *Development of agro-environmental scenarios to support pesticide risk assessment in Europe*. Science Direct. 15 p.

FABRE, M.F. (2010) *Estimation et spatialisation des propriétés physiques des sols de la Fontaine du Theil*. Rapport interne à Irstea. 48 p.

FABRE, M.F. (2010) *Caractérisation hydrodynamique de l'aquifère de la Fontaine du Theil, rapport interne Irstea*. 39p.

Food and Agriculture Organisation (FAO) of the united nations (2006) *Guidelines for soil description*. 109 p.

FOOTPRINT (2006). *State-of-the-art review on preferential flow*. Deliverable FL6. 38 p.

FOOTPRINT (2006). *Characteristics of European soil hydro-chemical scenarios*. Deliverable DL8. 46 p.

FOOTPRINT (2007). *Algorithm to completely parameterise MACRO from basic soil property data and soil and crop management options*. Deliverable DL21. 18 p.

JARVIS, N.J. (2002) *Indirect estimation of near-saturated hydraulic conductivity from readily available soil information*. Geoderma. 17 p.

LARSBO, M. et JARVIS, N. (2003) *MACRO5.0 A model of water flow and solute transport in macroporous soil. Technical description*. Swedish University of Agriculture Sciences. 49 p.

LINDERS et al. (2003) *Appendix C: Parameterization of drainage input*, FOCUS surface water scenarios in the EU evaluation process under 91/414/EEC. 15 p.

MAGDELENA, C. (2009) *Mise au point d'un indicateur de risque de contamination des eaux de surface par les pesticides, à l'échelle du petit bassin versant*. Mémoire d'Ingénieur de l'Agriculture et de l'Environnement. 96 p.

MAILLET-MEZERAY, J., B. REAL, J. THIERRY, N. MARQUET, C. GUYOT, J. J. GRIL, V. GOUY and N. CARLUER (2010). Bassin versant de la Fontaine du Theil. Produire et reconquérir la qualité de l'eau : une démarche active et concertée., ARVALIS-Institut du Végétal / UIPP 40 pp.

MOLENAT, J. et al. (2012) *Les voies de transfert : Circulation de l'eau et des polluants dans les bassins versants sur socles*. 9p.

NOLAN, B. et al. (2008). *Identification of key climatic factors regulating the transport of pesticides in leaching and to tile drains*, Pest Management Science. 933-944

STENEMO, F. et JARVIS, N. (2003). *Users guide to MACRO5.0, a model of water flow and solute transport in macroporous soil*. Studies in Biogeophysical Environment. 33 p.

SURDYK, N (2007). Contribution à l'amélioration de l'évaluation du risque à priori pour les eaux superficielles par les produits phytosanitaires : soutien à la construction de scénarios nationaux pour l'évaluation de préparation. Projet SSM, 144. 70-119

SURDYK, N. (2007) *Contribution à l'amélioration de l'évaluation du risque a priori pour les eaux superficielles par les produits phytosanitaires : soutien à la construction de scénario pour l'évaluation des préparations*. Projet SSM. 144 p.

Glossaire

BV : Bassin versant

CEMAGREF : Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et Forêts

CORPEN : Comité d'Orientation pour des Pratiques agricoles respectueuses de l'Environnement

FdT : Fontaine du Theil

FPT : Fonction de pédotransfert

FOOTPRINT : Functional Tools for Pesticide Risk Assessment and Management

GHC : Gradient hydraulique constant

IRSTEA : Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement

NP : Nappe dans le profil

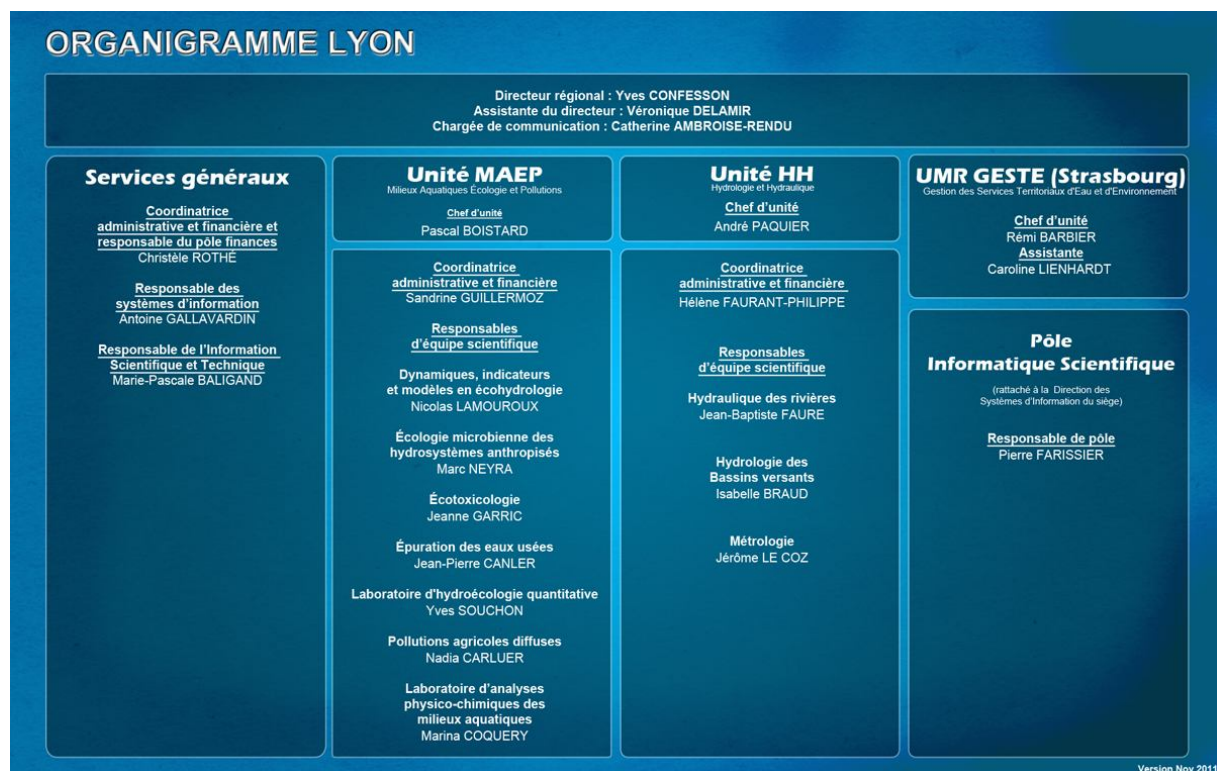
UIPP : l'Union des Industries et de Protection des Plantes

Liste des Annexes

Annexe 1 : Organigramme d'IRSTEA Lyon	26
Annexe 2 : Tableau de bord	27
Annexe 3 : Arbre de détermination des profils de sol	28
Annexe 4 : Liste des paramètres de MACRO	29
Annexe 5 : Propriétés des profils de sols	32
Annexe 6 : Propriétés hydrodynamiques obtenues avec MACRO et FOOTPRINT pour différents profils de sol	33
Annexe 7 : Les fonctions de pédotransfert Macro et Footprint	34
Annexe 8 : Test de l'influence de la structure, taille et forme des agrégats sur les différentes fonctions de pédotransfert	36
Annexe 9 : Test de l'influence du laboure sur propriétés hydrodynamiques dans Footprint	37
Annexe 10 : Désignation des horizons FAO (utilisé dans MACRO)	37
Annexe 11 : Propriétés hydrodynamiques obtenues par Footprint (valeur modifié en vert)	38
Annexe 12 : Calendrier cultural et de traitement du bassin versant de la Fontaine du Theil (1997-2006)	41
Annexe 13 : Calcul des propriétés des produits phytosanitaires pour chaque profil de sol	43
Annexe 14 : Données météorologiques	45
Annexe 15 : Résultats transfert de l'Isoproturon (pour l'ensemble du calendrier cultural)	46
Annexe 16 : Plan d'expérience Isoproturon	47
Annexe 17 : Plan d'expérience Atrazine et Sulcotrione	48
Annexe 18 : Résultats plan d'expérience Isoproturon	49
Annexe 19 : Résultats plan expérience Atrazine et Sulcotrione	50
Annexe 20 : Plan d'expérience avec les différents type de traitement	52
Annexe 21 : Résultats du plan d'expérience pour différents types de traitement	52

Annexes

Annexe 1 : Organigramme d'IRSTEA Lyon



Annexe 2 : Tableau de bord

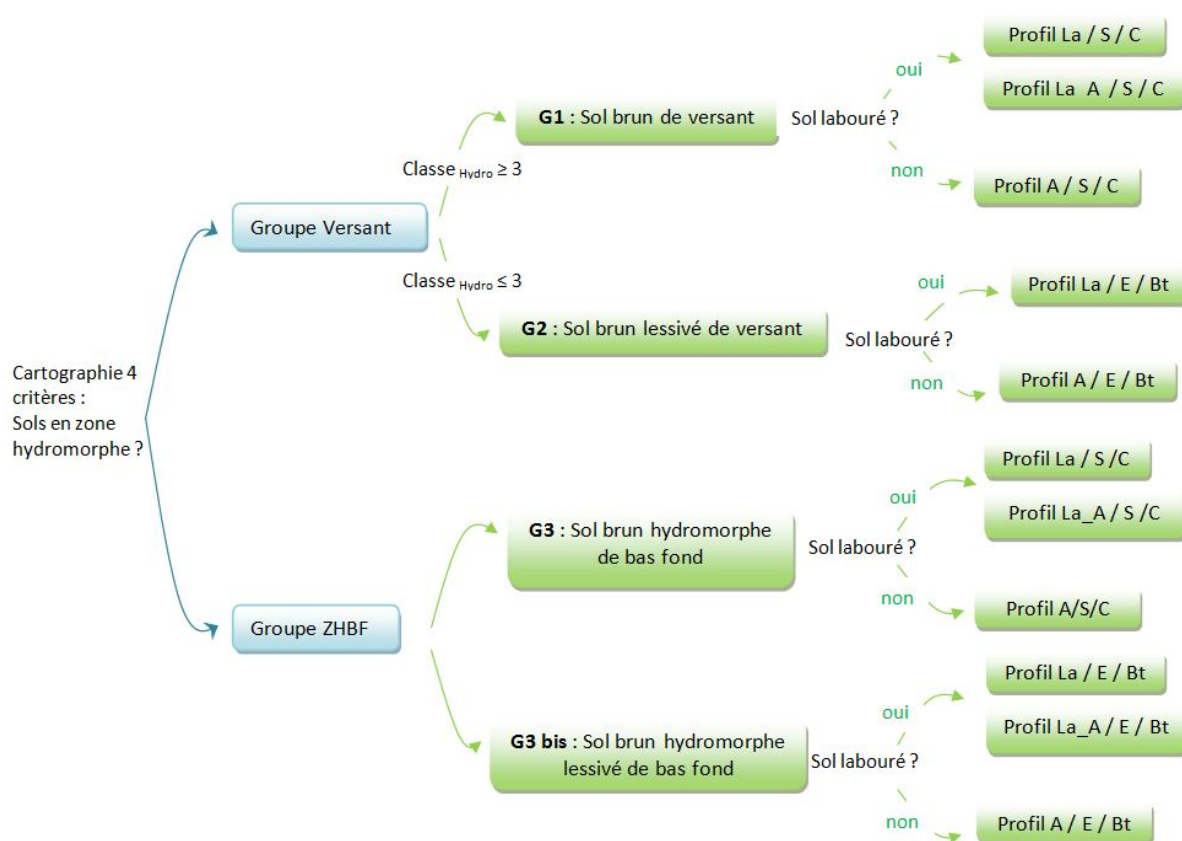
Tableau de bord

Stage du 2 avril 2012 au 29 juillet 2012
Modélisation du transfert des pesticides à l'échelle de la parcelle (MACRO + CEMAFOR)

Tableau mis à jour le 29/07/2012

Intitulé	PENDANT LE STAGE			PRIORITE	Suite à donner
	Nombre de jours de travail estimé	Nombre de jour de travail effectué	Avancement %		
Bibliographie	10	10	100%		
Etude des données relatives au bassin versant de la Fontaine du Theil	2	2	100%		
MACRO					
Prise en main du logiciel MACRO :					
- Entrainement à la simulation (données d'entrée Pluie + ETP 2002-2004 FdT)	5	5	100%		
- Etude des différentes données d'entrées, paramètres et variables de sorties					
- Choix des sorties intéressante à simuler					
Simulation pour tester les conditions aux limites (CI=drainage equilibrium) :					
- CL : Gradient hydraulique constant --> On fait varier le gradient	3	3	100%		
- Comparaison entre CL : "Gradient hydraulique constant" et "Nappe dans le profil"					
Simulation pour tester les conditions initiales :					
- On fait varier la teneur en eau dans les horizons pour simuler (période humide, moyenne, sèche)					
Interprétations					
Etude des fonction de pédotransfert du logiciel MACRO :					
Différence entre FpT MACRO5.1 et Footprint	7	7	100%		
Bibliographie : Delivrable Footprint					
Paramétrisation du modèle :					
Les différents types de sols de FdT ont été repris	10	10	100%		
Mise à jour des paramètres hydrodynamiques de chaque types de sol (footprint)					
Mise à jour des paramètres culturaux, phytos et initiaux (teneur en eau)					
Calcul du bgrad selon les CL choisies pour versant et ZHBF					
CEMAFOR - Couplage PEST MACRO					
Prise en main de l'outil CEMAFOR :					
Biblio : Tutoriel pour la compréhension préalable de ce couplage entre PEST et MACRO	5	5			
Explication du fonctionnement de l'outil par Bruno CHEVIRON (Irstea Montpellier)					
Préparation des fichiers d'entrées					
Essai de simulation pour comprendre les différentes sorties "soluté"					
Présentation du projet de travail sur Cemafor à Montpellier :					
Création d'un PP de présentation pour la réunion	3	3	100%		
Premières simulations pour présenter une idée des résultats à venir					
Simulation A pour tester :					
L'effet des différents profils de sol sur le bilan d'eau et de soluté	4.5	4.5	100%	ok	
L'effet de la pente (grad) sur le bilan d'eau et de soluté					
Simulation pour comprendre où sont les soluté	13	13			
Reflexion sur les paramètres à faire varier pour arranger le trop faible ruissellement					
Création des nouveaux parvar avec les nouveau paramètres	1	1			
Journées avec Bruno	2	2			
Réunion de mise au points sur le stage	2	2	100%		6 réunions
Rédaction du rapport	4	4	15%		
Présentation du travail de stage à la réunion d'UR (unité de recherche)	3	3	100%		
Activités supplémentaires					
Café biblio (présentation du projet de traçage sur la BE de Saint Joseph)	1.5	1.5			7 café biblio
Journée des thèses :					1 thèse
- Quantification et interprétation des flux de MES en amont du Rhône					
Déplacement à la Morcille (suivi d'un traçage sur bande enherbée) :					
- Relevés piézomètres : préleveurs automatiques (analyse en laboratoire)	1	1			1
- Relevés piézomètres : préleveurs manuels (mesure conductivité)					
- Relevés lysimètres avec pompes à vides					
- Relevé pluviométrique					
Soutenance d'HDR (Habilitation à Diriger des Recherche) de Véronique	1	1			
Total			78 jours		

Annexe 3 : Arbre de détermination des profils de sol



Nom	Sol (4 critères)	Développement de profil « MACRO »	Groupe
03P3	Nt3C3	Sol brun lessivé de versant. Av/Ev/Btv	G2
08P41	Ut1U1 (33%) N1B4 (66%)	Sol brun lessivé de versant. Av/Ev/Btv Sol brun de versant. Av/Sv/Cv	G1
03P2	Rt3B2	Sol brun lessivé de versant. Av/Ev/Btv	G1
01P4	Ut1U1 (50%) N1B3 (50%)	Sol brun lessivé de versant. Av/Ev/Btv Sol brun de versant. Av/Sv/Cv	G1
13P1	Nt3C3	Sol brun lessivé de versant. Av/Ev/Btv	G2
01P6	N1B4	Sol brun de versant. Av/Sv/Cv	G1
09P3	Rt3B2	Sol brun lessivé de versant. Av/Ev/Btv	G1
02P23	Nt3C3 (50%) V7V1 (50%)	Sol brun lessivé de versant. Av/Ev/Btv Fluviosol-colluviosol de bas fond. Abf/Ebf/Btbf	G2 G3 mais on prend G3bis ?

Annexe 4 : Liste des paramètres de MACRO

Parameters macro 5.2		
Crop parameters		
IDSTART	Day of crop emergence	Jan 1st. = day 1
ZDATEMIN	Intermediate crop development stage between emergence and maximum leaf area	
IDMAX	Day of maximum leaf area/root depth	
IHARV	Day of harvest	
CFORM	This control the rate of increase of leaf area between emergence and maximum leaf area	
DFORM	This control the rate of decrease of leaf area between maximum leaf area and harvest	
RPIN	Root distribution. The value refers to the percentage of root length in the top 25% of the root depth.	%
FAWC	Fraction of available water exhausted before reduction in transpiration occurs	
CRITAIR	Critical soil air content for root water uptake	%
BETA	Root adaptability factor	
CANCAP	Canopy interception capacity (mm)	mm
ZALP	Correction factor for wet canopy evaporation	
ROOTINIT	Root depth at ZDATEMIN	m
ROOTMAX	Maximum root depth	
LAIMIN	Leaf area index at ZDATEMIN	
LAIMAX	Maximum leaf area index	
LAIHAR	Leaf area at harvest	
Initial and boundary condition		
BGRAD	Empirical parameter controlling percolation out of the bottom of the profile	h-1
GRAD	Hydraulic gradient controlling flow from the bottom boundary	
THETAINI	Initial volumetric soil water content	%
Irrigation parameters		
IRRDAY	Day of irrigation	Jan 1st. = day 1
AMIR	Irrigation amount	mm
ZFINT	Fraction of irrigation intercepted by crop canopy	
CONCI	Solute concentration in irrigation water	mass.m-3
Physical parameters		
TPORV	Saturated water content	%
XMPORV	The volumetric water content at the boundary between macropores and micropores	
WILT	Wilting point	
RESID	Residual water content. In theory, the volumetric water content at which hydraulic conductivity may be considered negligible. In practice, used as a fittin parameter when modelling th water release characteristic. It can also be set to zero.	
GAMMA	Bulk density	g cm-3
CTEN	Boundary soil water tension	cm
N	Van Genuchten's N	
KSATMIN	Saturated hydraulic conductivity	mm.h-1
KSM	Boudary hydraulic conductivity. This is the conductivity when the micropores are saturated and the macropores empty	
ZN	Tortuosity/Pore size distribution factor (macropores)	
ZM	Tortuosity factor(micropores)	
ZP	Slope of the shrinkage characteristic	
ASCALE	Effective diffusion pathlength	mm
ALPHA	Van Genuchten's alpha. This détermine the shape of the water retention function and is related to a characteristic pore size in the soil	cm-1
TRAP_AIR	Trapped air content	%
Solute parameters		
ZKD	Sorption distribution coefficient	cm3 g-1
DEGMIL	Degradation rate coefficient, micropores, liquid phase	d-1
DEGMAL	Degradation rate coefficient, macropores, liquid phase	
DEGMIS	Degradation rate coefficient, micropores, solid phase	
DEGMAS	Degradation rate coefficient, macropores, solid phase	
FREUND	Freunlich exponent	

Outputs macro 5.2		
Misc. (Water)		
THETA	Water content (micropores)	m3 m-3
THETI	Water content (macropores)	
THETT	Water content (total)	
CPSI	Water tension	m
ZUPTAKE	Root water uptake	mm.h-1
WOUT	Water flow rate out of layer (micropores)	
EXCHANGE	Water exchange rates (positive from macropores)	
THETAMA	Degree of saturation in macropores	
WFLOWOUT	Water flow rate out of layer (macropores)	mm.h-1
PWT	Depth to grounwater table (this is the uppermost saturated layer)	m
Water balance		
Precipitation et irrigation		
TPRECIP	Precipitation rate	mm.h-1
TTPRECIP	Accumulated precipitation	mm
RAIN	Net rainfall (this is the precipitation rate minus the interception loss rate)	mm.h-1
RRNRAIN	Accumulated net rainfall (this is the total precipitation minus interception loss)	mm
ACCMELT	Accumulated snowmelt	
Evaporation and transpiration		
CETA	Actual ET rate	mm.h-1
EPOT	Potentiel ET rate	
CCEPOT	Accumulated ETP	mm
CPSOIL	Accumulated potentiel soil evaporation	mm.h-1
ESOIL	Actual soil evaporation rate	
CESOIL	Accumulated actual soil evaporation	mm
CCET	Accumulated actual ET	mm.h-1
PSOIL	Potentiel soil evaporation rate	
CCETA	Accumulated actual transpiration	mm
UPT	Potential transpiration rate	mm.h-1
CUPT	Accumulated potential transpiration	mm
ETA	Actual transpiration rate	mm.h-1
WETACT	Actual canopy evaporation rate	mm.h-1
CECT	Accumulated canopy evaporation	mm
Percolation and runoff		
TFLOWOUT	Accumulated percolation (total)	mm
TFLOW	Accumulated percolation (micropores)	
WWW	Percolation (total)	mm.h-1
SRUNOFF	Surface runoff	mm.h-1
TRUNOFF	Accumulated surface runoff	mm
Storage		
WATEREQ	Water equivalent in snowpack (mm)	mm
CRES	Water storage (canopy)	
TSTOREMI	Water storage in micropores (profile)	mm
TSTOREMA	Water storage in macropores (profile)	mm
Infiltration		
INFILMA	Infiltration rate (macropores)	mm.h-1
CINFIL	Accumulated infiltration	mm
INFILMI	Infiltration rate (micropores)	mm.h-1

Misc. (Other)		
TEMP	Soil temperature	°C
Tmax	Air temperature (daily maximum)	
Tmin	Air temperature (daily minimum)	
TAV	Air temperature (daily average)	
Solute balance		
SOLMIC	Solute concentration in soil solution (micropores)	mass m-3 water
SOLMAC	Solute concentration in soil solution (macropores)	
SFLOW	Solute flow rate out of layer (micropores)	mass m-2 h-1
SFLOWOUT	Solute flow rate out of layer (macropores)	
CEXCH	Solute exchange rate (each layer) (positive from macropores)	mass m-2
PAM	Solute stored in micropores (liquid phase)	
CAM	Solute stored in macropores (liquid phase)	
ADMI	Solute stored in micropores (liquid phase, equilibrium, sorption site)	
ADMA	Solute stored in macropores (liquid phase, equilibrium, sorption site)	
PAMT	Solute stored in micropores (liquid + solid phases)	
CAMT	Solute stored in macropores (liquid + solid phases)	mass m-3
PCAA	Solute storage (micro and macro, liquid + solid phases)	
SAMS	Solute storage (canopy)	mass m-2
Solute		
TSOUT	Accumulated solute leaching (total) (the total loss of solute out of the bottom of the profile)	mass m-2
TSS	Accumulated solute leaching (micropores)	
SSS	Solute leaching rate (total) (this is the total loss of solute out of the bottom of the soil)	mass m-2 h-1
TSRUN	Accumulated amount of soluble lost in surface runoff	mass m-2
TPAM	Solute storage in profile (micropore, liquid)	
TCAM	Solute storage in profile (macropore, liquid)	
GSINK	Accumulated amount of soluble lost to region groundwater	
CDEG	Accumulated amount of soluble dissipated from canopy	
TADMI	Solute storage in profile (micropore, solid)	
TADMA	Solute storage in profile (macropore, solid)	
TDEG	Accumulated amount of solute degraded in soil	
TUPT	Accumulated uptake of solube by crop	
SAMS	Solute storage (canopy)	

Annexe 5 : Propriétés des profils de sols

G1 : Profil La/S/C versant : sol brun cultivé de versant

Footprint → Conventionally-tilled

Horizon:	Clay %	Silt %	Sand %	pH	Bulk dens.	Org. C %	Thickness	Texture	Structure	Strength	Shape
Ap	16.38	64.24	19.38	6.85	1.22	0.69	30	silt loam	none		
B	14.71	58.36	26.93	6.55	1.3	0.83	30	silt loam	none		
C	8.7	65	26.3	6.45	1.6	0.09	60	silt loam	none		

G1 : Profil La_A/S/C versant : sol brun cultivé non labouré (tcs) de versant

Footprint → No till

Horizon:	Clay %	Silt %	Sand %	pH	Bulk dens.	Org. C %	Thickness	Texture	Structure	Strength	Shape
At	15.6	59.2	25.2	6.26	1.09	1.57	25	silt loam	none		
B	14.71	58.36	26.93	6.55	1.3	0.83	30	silt loam	none		
C	8.7	65	26.3	6.45	1.6	0.09	65	silt loam	none		

G1 : Profil A/S/C versant : sol brun non cultivé de versant

Footprint → Pérenne

Horizon:	Clay %	Silt %	Sand %	pH	Bulk dens.	Org. C %	Thickness	Texture	Structure	Strength	Shape
A	14.99	62.67	22.34	6.2	1.47	1.21	25	silt loam	none		
B	14.71	58.36	26.93	6.55	1.3	0.83	30	silt loam	none		
C	8.7	65	26.3	6.45	1.6	0.09	65	silt loam	none		

G2 : Profil La/E/Bt versant : sol brun cultivé lessivé de versant

Footprint → Conventionally-tilled

Horizon:	Clay %	Silt %	Sand %	pH	Bulk dens.	Org. C %	Thickness	Texture	Structure	Strength	Shape
Ap	16.38	64.24	19.38	6.84	1.22	0.69	30	silt loam	none		
E	14.9	66	19.1	7.13	1.4	0.08	30	silt loam	none		
B	16.48	69.03	14.49	6.24	1.6	0.09	60	silt loam	none		

G2 : Profil A/E/Bt versant : sol brun non cultivé lessivé de versant

Footprint → Pérenne

Horizon:	Clay %	Silt %	Sand %	pH	Bulk dens.	Org. C %	Thickness	Texture	Structure	Strength	Shape
A	14.99	62.67	22.34	6.2	1.47	1.21	25	silt loam	none		
E	14.9	66	19.1	7.13	1.4	0.08	30	silt loam	none		
B	16.48	69.03	14.49	6.24	1.6	0.09	65	silt loam	none		

G3 : Profil La/S/C bas fond : sol brun hydromorphe cultivé labouré de bas fond

Footprint → Conventionally-tilled

Horizon:	Clay %	Silt %	Sand %	pH	Bulk dens.	Org. C %	Thickness	Texture	Structure	Strength	Shape
Ap	16,38	64,24	19,38	6,84	1,22	0,69	30	silt loam	none		
B	14,35	64,1	21,55	6,4	1,4	0,64	60	silt loam	none		
C	8,7	65	26,3	6,45	1,6	0,09	30	silt loam	none		

G3 : Profil La_A/S/C bas fond : sol brun hydromorphe cultivé non labouré de bas fond

Footprint → No till

Horizon:	Clay %	Silt %	Sand %	pH	Bulk dens.	Org. C %	Thickness	Texture	Structure	Strength	Shape
At	15.6	59.2	25.2	6.26	1.09	1.57	25	silt loam	none		
B	14.35	64.1	21.55	6.4	1.4	0.64	60	silt loam	none		
C	8.7	65	26.3	6.45	1.6	0.09	35	silt loam	none		

G3 : Profil A/S/C bas fond : sol brun hydromorphe non cultivé de bas fond

Footprint → Pérenne

Horizon:	Clay %	Silt %	Sand %	pH	Bulk dens.	Org. C %	Thickness	Texture	Structure	Strength	Shape
A	14.99	62.67	22.34	6.2	1.17	1.21	30	silt loam	none		
B	14.35	64.1	21.55	6.4	1.4	0.64	60	silt loam	none		
C	8.7	65	26.3	6.45	1.6	0.09	30	silt loam	none		

Annexe 6 : Propriétés hydrodynamiques obtenues avec MACRO et FOOTPRINT pour différents profils de sol

			TPORV	XMPOR	WILT	RESID	GAMMA	CTEN potentiel mat	N	KSATMIN	KSM	ZN	ZM	ZP	ZA	ASCALE
			Theta sat	Theta sat mic	Pf 2,9	Theta res	Dapp	h (theta sat mic)	Van Gen.	K sat	K sat mic	Tortuosité mac	Tortuosité mic	Fente factor	Exponent	Diffusion
Sol La/S/Cv FdT	MACRO 5.0 sans labour	La	52,43	47,7	10,61	0	1,22	10	1,27	75,28	0,7832	4	0,5	0	1	5
		S	49,53	45,87	11,58	0	1,3	10	1,239	101,76	1,0914	4	0,5	0	1	20
		C	39,08	37,63	7,18	0	1,6	10	1,321	5,8	1,297	4	0,5	0	1	50
	Footprint Labour	La	51,7	47,7	10,61	0	1,22	10	1,27	61,15	1,1498	4	0,5	0	1	15
		S	47,47	45,87	11,58	0	1,3	10	1,239	32,85	0,8493	3	0,5	0	1	50
		C	38,03	37,63	7,18	0	1,6	10	1,321	5,39	1,3927	6	0,5	0	1	1
	Footprint sans labour	La	51,7	47,7	10,61	0	1,22	10	1,27	61,15	1,1498	4	0,5	0	1	15
		S	47,47	45,87	11,58	0	1,3	10	1,239	48,85	0,8493	2	0,5	0	1	150
		C	38,03	37,63	7,18	0	1,6	10	1,321	5,39	1,3927	6	0,5	0	1	1
Sol A/E/Bt FdT	MACRO 5.0 sans labour	A	54,08	48,8	11,38	0	1,17	10	1,257	94,19	0,9136	4	0,5	0	1	5
		E	46,2	43,58	10,01	0	1,4	10	1,266	61,98	0,8135	2	0,5	0	1	20
		Bt	39,08	38,08	12,29	0	1,6	10	1,222	1,36	0,6522	6	0,5	0	1	50
	Footprint sans labour	A	52,8	48,8	11,38	0	1,17	10	1,257	61,06	1,0605	4	0,5	0	1	15
		E	45,18	43,58	10,01	0	1,4	10	1,266	49,02	1,0169	2	0,5	0	1	150
		Bt	38,52	38,08	12,29	0	1,6	10	1,222	4,61	0,6116	6	0,5	0	1	1
Sol argilo sableux	MACRO 5.0 sans labour	A	54,08	48,44	15,92	0	1,17	10	1,179	124,35	1,548	4	0,5	0	1	5
		B	46,2	42,12	15,97	0	1,4	10	1,151	111	1,548	2	0,5	0	1	20
		C	39,08	36,44	17,81	0	1,6	10	1,11	23,59	1,3153	6	0,5	0	1	50
	Footprint sans labour		52,44	48,44	15,92	0	1,17	10	1,179	60,53	0,5262	4	0,5	0	1	15
			43,72	42,12	15,97	0	1,4	10	1,151	48,35	0,3549	2	0,5	0	1	150
			36,84	36,44	17,81	0	1,6	10	1,11	4,21	0,2092	6	0,5	0	1	1

Annexe 7 : Les fonctions de pédotransfert Macro et Footprint

Les fonctions de pédo-transfert Footprint permettent d'estimer les paramètres de l'équation de Van Genuchten et Mualem (α , n , m , θ_s , θ_r , l , K_s) à partir de base de données des propriétés hydrauliques des sols Européens : HYPRES (Wosten et al. 1999). Cette base de données regroupent des informations de 12 pays Européen, sur des données relatives aux sols (texture, %MO, masse volumique apparente, distinction horizon de surface–horizon profond) et à leur propriétés hydrodynamiques ($K(\theta)$ et $\theta(\psi)$). Une régression linéaire a été effectuée entre les paramètres de Van Genuchten et Mualem (issus des mesures de conductivités et de rétention en eau) et les propriétés de bases des sols. Aucune référence n'existe sur les FPT de base utilisé dans MACRO.

Les deux fonctions de pédotransfert ont également des méthodes différentes pour estimer les paramètres liés au transfert préférentiel. En effet MACRO se base sur la structure du sol (figure 7.2a) pour déterminer la longueur du trajet de diffusion (d). FOOTPRINT, lui, utilise des données de texture, de pratiques culturales, le type d'horizon et l'abondance des vers de terre (Footprint DL6) afin de déterminer des classes de potentiel de flux dans les macropores. Ceci prend la forme de d'arbre de décision (figure 7.1) basé sur des données empiriques (Jarvis et al. 2007). Ces données servent ensuite à définir des paramètres liés au transfert préférentiel :

- La macroporosité η_{ma}
- La longueur du trajet de diffusion d ;
- Le rapport tortuosité/distribution de tailles de pores dans les macropores n^*

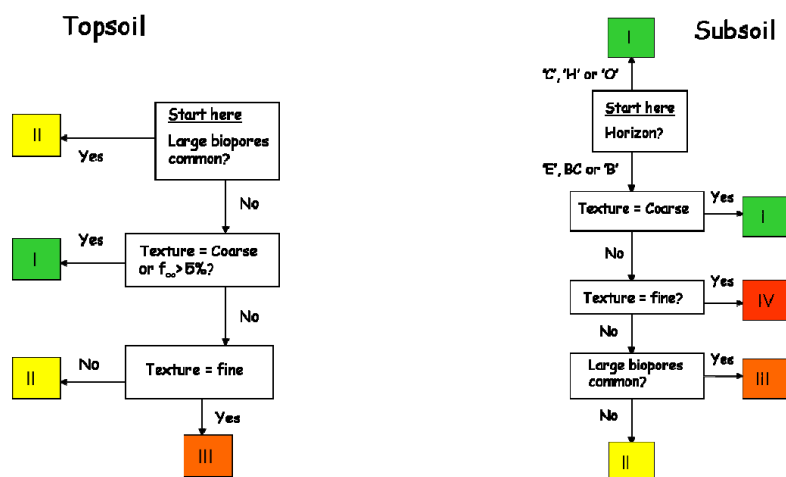


Figure 7.1 : Arbres de décision utilisés dans Footprint

Effective diffusion pathlength (mm) estimated from size and shape of aggregates and degree of structural development.

Size	Shape			
	Granular	Platy	Blocky	Prismatic
Fine	2	10	5	10
Medium	3	25	10	25
Coarse	5	50	25	50
Very coarse	10	50	50	100

Notes:

*Multiplication factors for degree of structural development:

Very weakly or weakly developed: 1.0
Moderately developed: 2.0
Strongly or very strongly developed: 3.0

*Structureless:

Effective diffusion pathlength = 1 mm (nominal zero).

Class	Effective diffusion pathlength (mm)	Kinematic exponent
I	1	6
II	15	4
III	50	3
IV	150	2

(a)

(b)

Figure 7.2 : Estimation de la longueur du trajet de diffusion dans (a) Macro (b) Footprint

La conductivité hydraulique à saturation dans les macropores ($K_{s(ma)}$) est alors :

$$K_{s(ma)} = \frac{B \cdot ma}{n^*}$$

Ou B est un facteur physique en $mm \cdot h^{-1}$. La macroporosité est déterminée comme indiqué dans la figure suivante :

Soil	Horizon	Texture		
		Fine	Medium	Coarse
Topsoil (mineral)	Undisturbed	0.05		
	A _t	0.05		
	A _p	0.03	0.04	0.05
Subsoil (mineral)	Upper B' or E'	0.016	0.016	0.05
	Lower B' or E'	0.008	0.008	0.05
	BC	0.002	0.004	0.04
	C	0.002	0.004	0.03
Organic	O	0.05		

Figure 7.3 : Détermination de la macroporosité avec l'option FOOTPRINT d'après Jarvis (2007)

Annexe 8 : Test de l'influence de la structure, taille et forme des agrégats sur les différentes fonctions de pédotransfert

Test Fonction de pédotransfert : Influence de STRUCTURE

Sol La/S/Cv FdT

Horizon	Clay %	Silt %	Sand %	pH	Bulk dens.	Org. C %	Thickness	Texture	Structure	Strength	Shape
Ap	16.38	64.24	19.38	6.84	1.22	0.69	30	silt loam	fine	weak	blocky
B	14.71	58.36	26.93	6.55	1.3	0.83	30	silt loam	medium	moderate	blocky
C	8.7	65	26.3	6.45	1.6	0.09	25	silt loam	coarse	weak	prismatic

TPORV	XMPOR	WILT	RESID	GAMMA	CTEN	N	KSATMIN	KSM	ZN	ZM	ZP	ZA	ASCAL	ALPHA	TRAP_AIR	STONE
Theta sat	Theta sat mic	Pf 2,9	Theta res	Dapp	h (theta sat mic)	Van Gen.	K sat	K sat mic	Tortuosité mac	Tortuosité mic	Fente factor	Exponent	Diffusion	Van Gen.	Piège	Element grossier

MACRO 5.0/5.1 sans labour	HORIZON A=B=C --> Structure = fine																	
	La	52.43	47.7	10.61	0	1.22	10	1.27	75.28	0.7832	4	0.5	0	1	5	0.019249	0	0
	S	49.53	45.87	11.58	0	1.3	10	1.239	101.76	1.0914	2	0.5	0	1	10	0.024149	0	0
	C	39.08	37.63	7.18	0	1.6	10	1.321	5.8	1.297	6	0.5	0	1	10	0.012072	0	0
	HORIZON A=B=C --> Shape = medium																	
	La														10			
	S														20			
	C														25			
	HORIZON A=B=C --> Shape = coarse																	
	La														25			
	S														50			
	C														50			

Footprint sans labour	HORIZON A=B=C -> Structure = fine/medium/coarse -> Pas d'influence sur les paramètres hydrodynamiques																	
	La	51.7	47.7	10.61	0	1.22	10	1.27	61.15	1.1498	4	0.5	0	1	15	0.019249	0	0
	S	47.47	45.87	11.58	0	1.3	10	1.239	48.85	0.8493	2	0.5	0	1	150	0.024149	0	0
	C	38.03	37.63	7.18	0	1.6	10	1.321	5.39	1.3927	6	0.5	0	1	1	0.012072	0	0

Test Fonction de pédotransfert : Influence de STRENGTH

Sol La/S/Cv FdT

Horizon	Clay %	Silt %	Sand %	pH	Bulk dens.	Org. C %	Thickness	Texture	Structure	Strength	Shape
Ap	16.38	64.24	19.38	6.84	1.22	0.69	30	silt loam	fine	weak	blocky
B	14.71	58.36	26.93	6.55	1.3	0.83	30	silt loam	medium	moderate	blocky
C	8.7	65	26.3	6.45	1.6	0.09	25	silt loam	coarse	weak	prismatic

TPORV	XMPOR	WILT	RESID	GAMMA	CTEN	N	KSATMIN	KSM	ZN	ZM	ZP	ZA	ASCAL	ALPHA	TRAP_AIR	STONE
Theta sat	Theta sat mic	Pf 2,9	Theta res	Dapp	h (theta sat mic)	Van Gen.	K sat	K sat mic	Tortuosité mac	Tortuosité mic	Fente factor	Exponent	Diffusion	Van Gen.	Piège	Element grossier

MACRO 5.0/5.1 sans labour	HORIZON A=B=C --> Strength = weak																	
	La	52.43	47.7	10.61	0	1.22	10	1.27	75.28	0.7832	4	0.5	0	1	5	0.019249	0	0
	S	49.53	45.87	11.58	0	1.3	10	1.239	61.69	1.0914	2	0.5	0	1	10	0.024149	0	0
	C	39.08	37.63	7.18	0	1.6	10	1.321	5.8	1.297	6	0.5	0	1	50	0.012072	0	0
	HORIZON A=B=C --> Strength = moderate																	
	La								119.31						10			
	S								101.76						20			
	C								11.81						100			
	HORIZON A=B=C --> Strength = strong																	
	La								238.06						15			
	S								224.4						30			
	C								44.1						50			

Footprint sans labour	HORIZON A=B=C -> Strength = weak/moderate/strong ==> Pas d'influence sur les paramètres hydrodynamiques																	
	La	51.7	47.7	10.61	0	1.22	10	1.27	61.15	1.1498	4	0.5	0	1	15	0.019249	0	0
	S	47.47	45.87	11.58	0	1.3	10	1.239	48.85	0.8493	2	0.5	0	1	150	0.024149	0	0
	C	38.03	37.63	7.18	0	1.6	10	1.321	5.39	1.3927	6	0.5	0	1	1	0.012072	0	0

Test Fonction de pédotransfert : Influence de SHAPE

Sol La/S/Cv FdT

Horizon	Clay %	Silt %	Sand %	pH	Bulk dens.	Org. C %	Thickness	Texture	Structure	Strength	Shape
Ap	16.38	64.24	19.38	6.84	1.22	0.69	30	silt loam	fine	weak	blocky
B	14.71	58.36	26.93	6.55	1.3	0.83	30	silt loam	medium	moderate	blocky
C	8.7	65	26.3	6.45	1.6	0.09	25	silt loam	coarse	weak	prismatic

TPORV	XMPOR	WILT	RESID	GAMMA	CTEN	N	KSATMIN	KSM	ZN	ZM	ZP	ZA	ASCALE	ALPHA	TRAP_AIR	STONE
Theta sat	Theta sat mic	Pf 2,9	Theta res	Dapp	h (theta sat mic)	Van Gen.	K sat	K sat mic	Tortuosité mac	Tortuosité mic	Fente factor	Exponent	Diffusion	Van Gen.	Piège	Element grossier

MACRO 5.0/5.1 sans labour	HORIZON A=B=C --> Shape = granular																	
	La	52.43	47.7	10.61	0	1.22	10	1.27	75.28	0.7832	4	0.5	0	1	2	0.019249	0	0
	S	49.53	45.87	11.58	0	1.3	10	1.239	101.76	1.0914	2	0.5	0	1	6	0.024149	0	0
	C	39.08	37.63	7.18	0	1.6	10	1.321	5.8	1.297	6	0.5	0	1	5	0.012072	0	0
	HORIZON A=B=C --> Shape = platy																	
	La														10			
	S														50			
	C														50			
	HORIZON A=B=C --> Shape = blocky																	
	La														5			
	S														20			
	C														50			
HORIZON A=B=C --> Shape = prismatic																		
La														10				
S														50				
C														50				

Footprint sans labour	HORIZON A=B=C --> Shape = granular/platy/blocky/prismatic --> Pas d'influence sur les paramètres hydrodynamiques																	
	La	51.7	47.7	10.61	0	1.22	10	1.27	61.15	1.1498	4	0.5	0	1	15	0.019249	0	0
	S	47.47	45.87	11.58	0	1.3	10	1.239	48.85	0.8493	2	0.5	0	1	150	0.024149	0	0
	C	38.03	37.63	7.18	0	1.6	10	1.321	5.39	1.3927	6	0.5	0	1	1	0.012072	0	0

Annexe 9 : Test de l'influence du laboure sur propriétés hydrodynamiques dans Footprint

Test Fonction de pédotransfert : Influence TILLAGE
Sol La/S/Cv FdT

Horizon	Clay %	Silt %	Sand %	pH	Bulk dens.	Org. C %	Thickness	Texture	Structure	Strength	Shape
Ap	16,38	64,24	19,38	6,84	1,22	0,69	30	silt loam	fine	weak	blocky
B	14,71	58,36	26,93	6,55	1,3	0,83	30	silt loam	medium	moderate	blocky
C	8,7	65	26,3	6,45	1,6	0,09	25	silt loam	coarse	weak	prismatic

TPORV	XMPOR	WILT	RESID	GAMM A	CTEN potentiel mat	N	KSATMIN	KSM	ZN	ZM	ZP	ZA	ASCALE	ALPHA	TRAP_AIR	STONE
Theta sat	Theta sat mic	Pf 2,9	Theta res	Dapp	h (theta sat mic)	Van Gen.	K sat	K sat mic	Tortuosité mac	Tortuosité mic	Fente factor	Exponent	Diffusion	Van Gen.	Piège	Element grossier
Footprint --> Conventionally-tilled																
La	51,7	47,7	10,61	0	1,22	10	1,27	61,15	1,1498	4	0,5	0	1	15	0,019249	0
S	47,47	45,87	11,58	0	1,3	10	1,239	32,85	0,8493	3	0,5	0	1	50	0,024149	0
C	38,03	37,63	7,18	0	1,6	10	1,321	5,39	1,3927	6	0,5	0	1	1	0,012072	0
Footprint --> Reduced till																
La																
S																
C																
Footprint --> No till																
La								48,85		2				150		
S																
C																
Footprint --> Perenne																
La	52,7							76,15								
S								48,85		2				150		
C																

Test Fonction de pédotransfert : Influence TILLAGE
Sol La_A/E/Bt bf FdT

Horizon	Clay %	Silt %	Sand %	pH	Bulk dens.	Org. C %	Thickness	Texture	Structure	Strength	Shape
Ap	16,38	64,24	19,38	6,84	1,22	0,69	30	silt loam	fine	weak	blocky
B	14,71	58,36	26,93	6,55	1,3	0,83	30	silt loam	medium	moderate	blocky
C	8,7	65	26,3	6,45	1,6	0,09	25	silt loam	coarse	weak	prismatic

TPORV	XMPOR	WILT	RESID	GAMM A	CTEN potentiel mat	N	KSATMIN	KSM	ZN	ZM	ZP	ZA	ASCALE	ALPHA	TRAP_AIR	STONE
Theta sat	Theta sat mic	Pf 2,9	Theta res	Dapp	h (theta sat mic)	Van Gen.	K sat	K sat mic	Tortuosité mac	Tortuosité mic	Fente factor	Exponent	Diffusion	Van Gen.	Piège	Element grossier
Footprint --> Conventionally-tilled																
La_A	55,08	51,08	12,74	0	1,09	10	1,243	60,98	0,9805	4	0,5	0	1	15	0,022695	0
E	44,08	43,28	10,89	0	1,4	10	1,248	16,87	0,0869	3	0,5	0	1	50	0,018992	0
Bt	38,03	37,63	7,18	0	1,6	10	1,321	5,39	1,3927	6	0,5	0	1	1	0,012072	0
Footprint --> Reduced till																
La_A																
E																
Bt																
Footprint --> No till																
La_A								24,87		2				150		
E																
Bt																
Footprint --> Perenne																
La_A	56,08							75,98								
E								24,87		2				150		
Bt								5,39								

Annexe 10 : Désignation des horizons FAO (utilisé dans MACRO)

A : organo minéral (influence de la biologie)

Ap : organo minéral labouré

B : horizon d'accumulation quelconque (illuvial)

E : horizon éluviaal (perte d'argile)

C : horizon d'altération de la roche mère

BC : transition entre un horizon pédologique et la roche mère

O : horizon organique

H : horizon humique

R : roche mère

Annexe 11 : Propriétés hydrodynamiques obtenues par Footprint (valeur modifié en vert)

G1 : Profil La/S/C versant : sol brun cultivé de versant

Footprint → Conventionally-tilled

Horizon:	Clay %	Silt %	Sand %	pH	Bulk dens.	Org. C %	Thickness	Texture	Structure	Strength	Shape
Ap	16.38	64.24	19.38	6.85	1.22	0.69	30	silt loam	none		
B	14.71	58.36	26.93	6.55	1.3	0.83	30	silt loam	none		
C	8.7	65	26.3	6.45	1.6	0.09	60	silt loam	none		

Horizon	Upper	Lower	TPORV	XMPOR	WILT	RESID	GAMMA	CTEN	N	KSATMIN
Ap	0	30.00	51.70	47.70	10.61	0	1.22	10.00	1.270	61.15
B	30.00	60.00	47.47	45.87	11.58	0	1.3	10.00	1.239	32.85
C	60.00	120.00	38.03	37.63	7.18	0	1.6	10.00	1.321	5.39

Horizon	Upper	Lower	KSM	ZN	ZM	ZP	ZA	ASCALE	ALPHA	TRAP_AIR
Ap	0	30.00	1.1498E-01	3	0.5	0	1	100	0.019249	0
B	30.00	60.00	8.4930E-02	2	0.5	0	1	150	0.024149	0
C	60.00	120.00	1.3927E-01	3	0.5	0	1	50	0.012072	0

G1 : Profil La_A/S/C versant : sol brun cultivé non labouré (tcs) de versant

Footprint → No till

Horizon:	Clay %	Silt %	Sand %	pH	Bulk dens.	Org. C %	Thickness	Texture	Structure	Strength	Shape
At	15.6	59.2	25.2	6.26	1.09	1.57	25	silt loam	none		
B	14.71	58.36	26.93	6.55	1.3	0.83	30	silt loam	none		
C	8.7	65	26.3	6.45	1.6	0.09	65	silt loam	none		

Horizon	Upper	Lower	TPORV	XMPOR	WILT	RESID	GAMMA	CTEN	N	KSATMIN
At	0	25.00	56.08	51.08	12.74	0	1.09	10.00	1.243	50.98
B	25.00	55.00	47.47	45.87	11.58	0	1.3	10.00	1.239	48.85
C	55.00	120.00	38.03	37.63	7.18	0	1.6	10.00	1.321	5.39

Horizon	Upper	Lower	KSM	ZN	ZM	ZP	ZA	ASCALE	ALPHA	TRAP_AIR
At	0	25.00	9.8055E-02	3	0.5	0	1	100	0.022695	0
B	25.00	55.00	8.4930E-02	2	0.5	0	1	150	0.024149	0
C	55.00	120.00	1.3927E-01	3	0.5	0	1	50	0.012072	0

G1 : Profil A/S/C versant : sol brun non cultivé de versant

Footprint → Pérenne

Horizon:	Clay %	Silt %	Sand %	pH	Bulk dens.	Org. C %	Thickness	Texture	Structure	Strength	Shape
A	14.99	62.67	22.34	6.2	1.47	1.21	25	silt loam	none		
B	14.71	58.36	26.93	6.55	1.3	0.83	30	silt loam	none		
C	8.7	65	26.3	6.45	1.6	0.09	65	silt loam	none		

Horizon	Upper	Lower	TPORV	XMPOR	WILT	RESID	GAMMA	CTEN	N	KSATMIN
A	0	25.00	45.13	40.13	11.04	0	1.47	10.00	1.239	75.74
B	25.00	55.00	47.47	45.87	11.58	0	1.3	10.00	1.239	48.85
C	55.00	120.00	38.03	37.63	7.18	0	1.6	10.00	1.321	5.39

Horizon	Upper	Lower	KSM	ZN	ZM	ZP	ZA	ASCALE	ALPHA	TRAP_AIR
A	0	25.00	7.4212E-02	3	0.5	0	1	100	0.016122	0
B	25.00	55.00	8.4930E-02	2	0.5	0	1	150	0.024149	0
C	55.00	120.00	1.3927E-01	3	0.5	0	1	50	0.012072	0

G2 : Profil La/E/Bt versant : sol brun cultivé lessivé de versant

Footprint → Conventionally-tilled

Horizon:	Clay %	Silt %	Sand %	pH	Bulk dens.	Org. C %	Thickness	Texture	Structure	Strength	Shape
Ap	16.38	64.24	19.38	6.84	1.22	0.69	30	silt loam	none		
E	14.9	66	19.1	7.13	1.4	0.08	30	silt loam	none		
B	16.48	69.03	14.49	6.24	1.6	0.09	60	silt loam	none		

Horizon	Upper	Lower	TPORV	XMPOR	WILT	RESID	GAMMA	CTEN	N	KSATMIN
Ap	0	30.00	51.70	47.70	10.61	0	1.22	10.00	1.270	61.15
E	30.00	60.00	45.18	43.58	10.01	0	1.4	10.00	1.266	33.02
B	60.00	120.00	38.92	38.12	12.29	0	1.6	10.00	1.222	16.61

Horizon	Upper	Lower	KSM	ZN	ZM	ZP	ZA	ASCALE	ALPHA	TRAP_AIR
Ap	0	30.00	1.1498E-01	3	0.5	0	1	100	0.019249	0
E	30.00	60.00	1.0169E-01	2	0.5	0	1	150	0.01842	0
B	60.00	120.00	6.1155E-02	3	0.5	0	1	50	0.011406	0

G2 : Profil A/E/Bt versant : sol brun non cultivé lessivé de versant

Footprint → Pérenne

Horizon:	Clay %	Silt %	Sand %	pH	Bulk dens.	Org. C %	Thickness	Texture	Structure	Strength	Shape
A	14.99	62.67	22.34	6.2	1.47	1.21	25	silt loam	none		
E	14.9	66	19.1	7.13	1.4	0.08	30	silt loam	none		
B	16.48	69.03	14.49	6.24	1.6	0.09	65	silt loam	none		

Horizon	Upper	Lower	TPORV	XMPOR	WILT	RESID	GAMMA	CTEN	N	KSATMIN
A	0	25.00	45.13	40.13	11.04	0	1.47	10.00	1.239	75.74
E	25.00	55.00	45.18	43.58	10.01	0	1.4	10.00	1.266	49.02
B	55.00	120.00	38.92	38.12	12.29	0	1.6	10.00	1.222	24.61

Horizon	Upper	Lower	KSM	ZN	ZM	ZP	ZA	ASCALE	ALPHA	TRAP_AIR
A	0	25.00	7.4212E-02	3	0.5	0	1	100	0.016122	0
E	25.00	55.00	1.0169E-01	2	0.5	0	1	150	0.01842	0
B	55.00	120.00	6.1155E-02	3	0.5	0	1	50	0.011406	0

G3 : Profil La/S/C bas fond : sol brun hydromorphe cultivé labouré de bas fond

Footprint → Conventionally-tilled

Horizon:	Clay %	Silt %	Sand %	pH	Bulk dens.	Org. C %	Thickness	Texture	Structure	Strength	Shape
Ap	16,38	64,24	19,38	6,84	1,22	0,69	30	silt loam	none		
B	14,35	64,1	21,55	6,4	1,4	0,64	60	silt loam	none		
C	8,7	65	26,3	6,45	1,6	0,09	30	silt loam	none		

Horizon	Upper	Lower	TPORV	XMPOR	WILT	RESID	GAMMA	CTEN	N	KSATMIN
Ap	0	30.00	51.70	47.70	10.61	0	1.22	10.00	1.270	61.15
B	30.00	90.00	44.08	43.28	10.89	0	1.4	10.00	1.248	16.87
C	90.00	120.00	38.03	37.63	7.18	0	1.6	10.00	1.321	5.39

Horizon	Upper	Lower	KSM	ZN	ZM	ZP	ZA	ASCALE	ALPHA	TRAP_AIR
Ap	0	30.00	1.1498E-01	3	0.5	0	1	100	0.019249	0
B	30.00	60.00	8.6988E-02	2	0.5	0	1	150	0.018992	0
C	60.00	90.00	1.3927E-01	3	0.5	0	1	50	0.012072	0

G3 : Profil La_A/S/C bas fond : sol brun hydromorphe cultivé non labouré de bas fond

Footprint → No till

Horizon:	Clay %	Silt %	Sand %	pH	Bulk dens.	Org. C %	Thickness	Texture	Structure	Strength	Shape
At	15.6	59.2	25.2	6.26	1.09	1.57	25	silt loam	none		
B	14.35	64.1	21.55	6.4	1.4	0.64	60	silt loam	none		
C	8.7	65	26.3	6.45	1.6	0.09	35	silt loam	none		

Horizon	Upper	Lower	TPORV	XMPOR	WILT	RESID	GAMMA	CTEN	N	KSATMIN
At	0	25.00	56.08	51.08	12.74	0	1.09	10.00	1.243	50.98
B	25.00	85.00	44.08	43.28	10.89	0	1.4	10.00	1.248	24.87
C	85.00	120.00	38.03	37.63	7.18	0	1.6	10.00	1.321	5.39

Horizon	Upper	Lower	KSM	ZN	ZM	ZP	ZA	ASCALE	ALPHA	TRAP_AIR
At	0	25.00	9.8055E-02	3	0.5	0	1	100	0.022695	0
B	25.00	85.00	8.6988E-02	2	0.5	0	1	150	0.018992	0
C	85.00	120.00	1.3927E-01	3	0.5	0	1	50	0.012072	0

G3 : Profil A/S/C bas fond : sol brun hydromorphe non cultivé de bas fond

Footprint → Pérenne

Horizon:	Clay %	Silt %	Sand %	pH	Bulk dens.	Org. C %	Thickness	Texture	Structure	Strength	Shape
A	14.99	62.67	22.34	6.2	1.17	1.21	30	silt loam	none		
B	14.35	64.1	21.55	6.4	1.4	0.64	60	silt loam	none		
C	8.7	65	26.3	6.45	1.6	0.09	30	silt loam	none		

Horizon	Upper	Lower	TPORV	XMPOR	WILT	RESID	GAMMA	CTEN	N	KSATMIN
A	0	30.00	53.80	48.80	11.38	0	1.17	10.00	1.257	76.06
B	30.00	90.00	44.08	43.28	10.89	0	1.4	10.00	1.248	24.87
C	90.00	120.00	38.03	37.63	7.18	0	1.6	10.00	1.321	5.39

Horizon	Upper	Lower	KSM	ZN	ZM	ZP	ZA	ASCALE	ALPHA	TRAP_AIR
A	0	30.00	1.0605E-01	3	0.5	0	1	100	0.021136	0
B	30.00	90.00	8.6988E-02	2	0.5	0	1	150	0.018992	0
C	90.00	120.00	1.3927E-01	3	0.5	0	1	50	0.012072	0

Annexe 12 : Calendrier cultural et de traitement du bassin versant de la Fontaine du Theil (1997-2006)

G2	Parcelle 03P3																
	Culture	Semis		IDSTART	ZDATEMIN	IDMAX	IHARV (récolte)		Molécule	IRRDAY			Décalage	Type	Quantité	AMIR	CONCI
		date	jour julien				date	jour julien		date	N° année	jour julien					
97-98	Blé	5-nov.-97	309	320	21	68	5-août-98	217	IPU	1-mars-98	2	60	116j	post-tardif	1000	0.2	5.00E+05
98-99	Maïs	12-mai-99	132	137	138	171	23-sept.-99	266	ATR	10-mai-99	3	130	2j avant	pré	1800	0.2	9.00E+05
99-00*	Blé	5-nov.-99	309	321	22	66	7-août-00	220	IPU	10-mars-00	4	70	126j	post-tardif	1000	0.2	5.00E+05
2000*-2001	Maïs	31-mai-01	152	155	156	184	14-oct.-01	318	ATR	31-mai-00	4	152	0j	pré	500	0.2	2.50E+05
2001-2002	Blé	13-nov.-01	317	331	32	70	22-juil.-02	203	IPU	13-nov.-01	5	317	0j	pré-levée	1000	0.2	5.00E+05
2002-2003	Maïs	6-mai-03	126	130	132	164	13-oct.-03	286	Phacélie-Moutarde	25-sept.-03							
									ATR	7-mai-02	6	127	1 j avant	pré-levée	1000	0.2	5.00E+05
2004*-2005	Maïs	2-mai-04	123	129	130	161	15-oct.-05	288	Sulco	2-mai-04	8	123	0j	pré-levée	240	0.2	1.20E+05
2005-2006	Blé	5-nov.-04	309	319	39	85	20-juil.-06	201	IPU	20-févr.-05	9	51	107j	post-tardif	600	0.2	3.00E+05

* année bissextile

En gras : les valeurs calculées

G1	Parcelle 08P41																
	Culture	Semis		IDSTART	ZDATEMIN	IDMAX	IHARV (récolte)		Molécule	IRRDAY			Décalage	Type	Quantité	AMIR	CONCI
		date	jour julien				date	jour julien		date	N° année	jour julien					
1997-1998	Blé	22-oct.-97	295	304	3	52	5-août-98	217	IPU	6-févr.-98	2	37	107j	post-tardif	750	0.2	3.75E+05
1998-1999	Maïs	5-mai-99	125	129	131	165	17-juil.-99	198	Sulco	10-juin-99	3	161	36j	post-tardif	210	0.2	1.05E+05
1999-2000*	Blé	28-oct.-99	301	309	3	55	10-août-00	223	IPU	24-janv.-00	4	25	88j	post-tardif	500	0.2	2.50E+05
											loxynil						
2000*-2001	Maïs	10-mai-01	131	134	135	167	29-sept.-01	272	Sulco	9-juin-01	5	161	30j	post-tardif	210	0.2	1.05E+05
2001-2002	Blé	31-oct.-01	304	315	19	57	15-août-02	166	IPU	7-févr.-02	6	38	99j	post-tardif	750	0.2	3.75E+05
2003-2004*	Blé	4-oct.-03	276	285	331	13	10-août-04	223	IPU	10-déc.-03	7	344	36j	post-tardif	1050	0.2	5.25E+05

G1	Parcelle 03P2																
	Culture	Semis		IDSTART	ZDATEMIN	IDMAX	IHARV (récolte)		Molécule	IRRDAY			Décalage	Type	Quantité	AMIR	CONCI
		date	jour julien				date	jour julien		date	N° année	jour julien					
1997-1998	Blé	5-nov.-97	309	320	21	68	5-sept.-98	248	IPU	1-mars-98	2	60	116j	post-tardif	1000	0.2	5.00E+05
1998-1999	Maïs	11-mai-99	131	136	137	170	23-sept.-99	266	ATR	10-mai-99	3	130	1j avant	pré	1800	0.2	9.00E+05
1999-2000*	Blé	5-nov.-99	309	321	22	66	7-août-00	220	IPU	10-mars-00	4	70	126j	post-tardif	1000	0.2	5.00E+05
2001-2002	Maïs	15-avr.-01	105	112	114	150	13-oct.-02	287	ATR	16-avr.-01	5	107	1j	pré	500	0.2	2.50E+05
2002-2003	Blé	13-nov.-02	317	328	28	72	22-juil.-03	203	IPU	20-févr.-03	7	51	99j	post-tardif	1000	0.2	5.00E+05
CIPAN									loxynil	7			144	0.2	7.20E+04		
2003-2004	Maïs	11-mai-03	131	136	138	168	15-oct.-04	258	Phacélie-Moutarde	10-août-03							
									Sulco	11-juin-03	7	162	30i	post-tardif	300	0.2	1.50E+05

G1	Parcelle 01P4																
	Culture	Semis		IDSTART	ZDATEMIN	IDMAX	IHARV (récolte)		Molécule	IRRDAY			Décalage	Type	Quantité	AMIR	CONCI
		date	jour julien				date	jour julien		date	N° année	jour julien					
1998-1999	Maïs	4-mai-98	124	128	129	161	18-juil.-98	199	ATR	4-mai-98	1	124	1j	pré-levée	750	0.2	3.75E+05
1999-2000	Blé	26-nov.-98	330	342	44	82	22-juil.-00	204	IPU	27-janv.-99	2	28	62j	post-tardif	1000	0.2	5.00E+05
2000-2001	Maïs	13-mai-00	134	138	139	171	25-juil.-00	207	Dimé	17-mai-00	3	138	4j	post-précose	1080	0.2	5.40E+05
2001-2002	Blé	26-oct.-00	299	308	11	50	28-juil.-02	209	IPU	4-mars-01	4	63	129j	post-tardif	500	0.2	2.50E+05

G2	Parcelle 13P1																
	Culture	Semis		IDSTART	ZDATEMIN	IDMAX	IHARV (récolte)		Molécule	IRRDAY			Décalage	Type	Quantité	AMIR	CONCI
		date	jour julien				date	jour julien		date	N° année	jour julien					
97-98	Maïs	11-mai-97	131	134	135	168	24-juil.-97	205	ATR	1-juin-97	1	152	21j	Post-tardif	750	0.2	3.75E+05
98-99	Blé	28-oct.-97	301	311	13	60	26-juil.-99	207	IPU	2-févr.-98	2	33	97j	Post-tardif	1000	0.2	5.00E+05
									loxynil		2				450	0.2	2.25E+05
99-00*	Maïs	4-mai-99	124	128	129	164	17-juil.-99	198	ATR	5-juin-99	3	156	32j	Post-tardif	500	0.2	2.50E+05
									Sulco		3				240	0.2	1.20E+05
2000*-2001	Blé	20-oct.-99	294	303	353	37	31-juil.-00	213	IPU	20-janv.-00	4	20	92j	Post-tardif	1100	0.2	5.50E+05
2002-2003	Blé	28-oct.-02	301	310	364	55	25-juil.-03	206	IPU	10-févr.-03	7	41	105j	Post-tardif	1400	0.2	7.00E+05
2003-2004	Maïs	28-avr.-04	118	124	126	159	12-juil.-03	194	Phacélie-Moutarde	5-août-02							
									Sulco	1-juil.-03	7	182	64j	Post-tardif	60	0.2	3.00E+04
2004-2005	Blé	1-nov.-04	306	316	14	70	2-juil.-05	183	IPU	31-janv.-05	9	31	91j	Post-tardif	1100	0.2	5.50E+05

G1	Parcelle 01P6																	
	Culture	Semis		IDSTART	ZDATEMIN	IDMAX	IHARV (récolte)		Molécule	IRRDAY			Décalage	Type	Quantité	AMIR	CONCI	
		date	jour julien				date	jour julien		date	N° année	jour julien						
1999-2000*	Maïs	7-mai-99	127	131	133	167	19-juil.-99	200	Dimé	9-mai-99	1	129	2j	post	900	0.2	4.50E+05	
2000*-2001	Blé	24-oct.-99	298	307	358	42	9-juil.-01	190	IPU	21-févr.-00	2	52	120j	post	1000	0.2	5.00E+05	
2001-2002	Maïs	23-avr.-01	113	118	120	155	8-oct.-02	281	PRAIRIE	13-sept.-01								
2002-2003	Blé	29-oct.-01	302	311	365	57	18-juil.-03	199	Sulco	29-mai-01	3	149	36j	???bisard		300	0.2	1.50E+05
									IPU	20-févr.-02	4	51	114j	post	500	0.2	2.50E+05	

G1	Parcelle 09P3																
	Culture	Semis		IDSTART	ZDATEMIN	IDMAX	IHARV (récolte)		Molécule	IRRDAY			Décalage	Type	Quantité	AMIR	CONCI
		date	jour julien				date	jour julien		date	N° année	jour julien					
98-99	Blé	5-nov.-98	309	320	24	70	1-août-99	213	IPU	1-févr.-99	2	32	88j	post	1000	0.2	5.00E+05
99-00*	Maïs	5-mai-00	125	130	131	166	9-oct.-00	283	ATR	6-mai-00	3	127	1j	post-précoce	500	0.2	2.50E+05
2000*-2001	Blé	5-nov.-00	310	322	10	60	31-juil.-01	212	IPU	22-févr.-01	4	53	109j	post	1000	0.2	5.00E+05
									loxynil		4			300	0.2	1.50E+05	
2001-2002	Maïs	3-mai-02	123	128	130	164	11-oct.-02	284	Dimé	3-mai-02	5	123	1j	post-précoce	1380	0.2	6.90E+05
2003-2004	Blé	21-oct.-03	294	306	360	39	21-août-04	234	IPU	12-févr.-03	6	44	114j	post	1000	0.2	5.00E+05
2005-2006	Blé	7-nov.-05	311	323	43	87	25-juil.-06	206	IPU	4-avr.-06	9	94	148j	post	900	0.2	4.50E+05

G2 G3 ou G3bis	Parcelle 02P23																
	Culture	Semis		IDSTART	ZDATEMIN	IDMAX	IHARV (récolte)		Molécule	IRRDAY			Décalage	Type	Quantité	AMIR	CONCI
		date	jour julien				date	jour julien		date	N° année	jour julien					
97-98	Mais	20-mai-97	140	144	146	178	4-août-97	216	ATR	20-mai-97	1	140	0j	post tardif	1800	0.2	9.00E+05
99-00*	Mais	16-mai-99	136	141	142	174	26-juil.-99	207	Dimé	16-mai-99	3	136	0j		1350	0.2	6.75E+05
									Sulco		3	300	0.2		1.50E+05		
2001-2002	Mais	2-mai-01	122	128	130	161	13-juil.-01	194	Dimé	2-mai-01	5	122	0j		1350	0.2	6.75E+05
									Sulco		5	164	42j		300	0.2	1.50E+05
2003-2004	Mais	29-mai-03	149	152	153	179	30-juil.-03	211	Sulco	5-juin-03	7	156	37j	225	0.2	1.13E+05	

Annexe 13 : Calcul des propriétés des produits phytosanitaires pour chaque profil de sol

Sol brun cultivé de versant. **G1**

		Zkd	Freundlich	DEG(MIL/MAL/MIS/MAS)
Ioxynil Lav/Sv/Cv	Lav	2.0907	0.92	0.2
	Sv	2.5149	0.92	0.1
	Cv	0.2727	0.92	0.04
Sulcotrione Lav/Sv/Cv	Lav	0.2484	0.839	0.28
	Sv	0.2988	0.839	0.17
	Cv	0.0324	0.839	0.056
Atrazine Lav/Sv/Cv	Lav	1.2006	1.07	0.034
	Sv	1.4442	1.07	0.017
	Cv	0.1566	1.07	0.0068
Diméthanamide Lav/Sv/Cv	Lav	0.4761	0.961	0.077
	Sv	0.5727	0.961	0.0385
	Cv	0.0621	0.961	0.0046
Isoproturon Lav/Sv/Cv	Lav	0.8418	0.8	0.043
	Sv	1.0126	0.8	0.0215
	Cv	0.1098	0.8	0.0086

Sol brun cultivé non labouré de versant. **G1 non labouré**

		Zkd	Freundlich	DEG(MIL/MAL/MIS/MAS)
Ioxynil La_Av/Sv/Cv	La_Av	4.7571	0.92	0.2
	Sv	2.5149	0.92	0.117
	Cv	0.2727	0.92	0.0492
Sulcotrione La_Av/Sv/Cv	La_Av	0.5652	0.839	0.28
	Sv	0.2988	0.839	0.163
	Cv	0.0324	0.839	0.0689
Atrazine La_Av/Sv/Cv	La_Av	2.7318	1.07	0.034
	Sv	1.4442	1.07	0.01983
	Cv	0.1566	1.07	0.00837
Diméthanamide La_Av/Sv/Cv	La_Av	1.0833	0.961	0.077
	Sv	0.5727	0.961	0.04492
	Cv	0.0621	0.961	0.01895
Isoproturon La_Av/Sv/Cv	La_Av	1.9154	0.8	0.043
	Sv	1.0126	0.8	0.025083
	Cv	0.1098	0.8	0.0106

Sol brun lessivé cultivé de versant. **G2**

		Zkd	Freundlich	DEG(MIL/MAL/MIS/MAS)
Ioxynil Lav/Ev/Btv	Lav	2.0907	0.92	0.2
	Ev	0.2424	0.92	0.1
	Btv	0.2727	0.92	0.04
Sulcotrione Lav/Ev/Btv	Lav	0.2484	0.839	0.28
	Ev	0.0288	0.839	0.14
	Btv	0.0324	0.839	0.056
Atrazine Lav/Ev/Btv	Lav	1.2006	1.07	0.034
	Ev	0.1392	1.07	0.017
	Btv	0.1566	1.07	0.0068
Diméthenamide Lav/Ev/Btv	Lav	0.4761	0.961	0.077
	Ev	0.0552	0.961	0.0385
	Btv	0.0621	0.961	0.0154
Isoproturon Lav/Ev/Btv	Lav	0.8418	0.8	0.043
	Ev	0.0976	0.8	0.0215
	Btv	0.1098	0.8	0.0086

Sol brun hydromorphe de bas fond, cultivé. **G3**

		Zkd	Freundlich	DEG(MIL/MAL/MIS/MAS)
Ioxynil Labf/Sbf/Cbf	Labf	2.0907	0.92	0.2
	Sbf	1.9392	0.92	0.08
	Cbf	0.2727	0.92	0.02
Sulcotrione Labf/Sbf/Cbf	Labf	0.2484	0.839	0.28
	Sbf	0.2304	0.839	0.112
	Cbf	0.0324	0.839	0.028
Atrazine Labf/Sbf/Cbf	Labf	1.2006	1.07	0.034
	Sbf	1.1136	1.07	0.0136
	Cbf	0.1566	1.07	0.0034
Diméthenamide Labf/Sbf/Cbf	Labf	0.4761	0.961	0.077
	Sbf	0.4461	0.961	0.0308
	Cbf	0.0621	0.961	0.0077
Isoproturon Labf/Sbf/Cbf	Labf	0.8418	0.8	0.043
	Sbf	0.7808	0.8	0.0172
	Cbf	0.1098	0.8	0.0043

Sol brun hydromorphe de bas fond, non labouré. **G3 non labouré**

		Zkd	Freundlich	DEG(MIL/MAL/MIS/MAS)
Ioxynil La_Abf/Sbf/Cbf	La_Abf	4.7571	0.92	0.2
	Sbf	1.9392	0.92	0.1
	Cbf	0.2727	0.92	0.0257
Sulcotrione La_Abf/Sbf/Cbf	La_Abf	0.5652	0.839	0.28
	Sbf	0.2304	0.839	0.14
	Cbf	0.0324	0.839	0.036
Atrazine La_Abf/Sbf/Cbf	La_Abf	2.7318	1.07	0.034
	Sbf	1.1136	1.07	0.017
	Cbf	0.1566	1.07	0.00437
Diméthenamide La_Abf/Sbf/Cbf	La_Abf	1.0833	0.961	0.077
	Sbf	0.4416	0.961	0.0385
	Cbf	0.0621	0.961	0.0099
Isoproturon La_Abf/Sbf/Cbf	La_Abf	1.9154	0.8	0.043
	Sbf	0.7808	0.8	0.0215
	Cbf	0.1098	0.8	0.00553

Annexe 14 : Données météorologiques

Années	Pluies FdT (mm)	ETP FdT (mm)	ETP Jaillière (mm)
1997 - 1998	664.9	754	752
1998 - 1999	942	813	608
1999 - 2000	962.9	796	642
2000 - 2001	1200.9	830	640
2001 - 2002	739.4	833	633
2002 - 2003	842.5	882	737
2003 - 2004	848.26	874	*677
2004 - 2005	543.2	870	*642(1999/2000)
2005 - 2006	733.6		*642 (1999/2000)
Moyennes	830.8 mm	831.5 mm	664 mm

*manque de données réelles

Annexe 15 : Résultats transfert de l'Isoproturon (pour l'ensemble du calendrier cultural)

Parcelle	année	année ant.	date de semis	date traitement	date traitement (année hydro)	dose (g/ha)	delai (j)	% ruiss av été	% ruiss ap été	ruiss 1an	ruiss 2ans	%perco av été	% perco ap été	perco 1an	perco 2ans
G1 03P2	1997-1999	néant	309	60	182	1000	116	0.00E+00	1.17E-04	0.000	0.01	0.42	0.11	9.36	0.28
G1 03P2	1999-2001	maïs	309	70	192	1000	126	4.40E-08	7.43E-04		0.00	0.02	0.06	0.05	0.10
G1 03P2	2002-2003	maïs	317	51	173	1000	99	0.00E+00	0.00E+00	0.000		0.00	0.00	0.00	
G1 01P4	1998-2000	maïs	330	28	150	1000	63	0.00E+00	1.76E-04	0.000	0.00	7.59	0.61	42.45	2.00
G1 01P4	2000-2002	maïs	299	63	185	500	129	2.19E+00	4.00E-04	23.868	0.01	10.21	0.65	8.72	1.53
G1 01P6	1999-2001	maïs	298	52	174	1000	119	1.24E-03	7.99E-04	0.000	0.00	0.05	0.38	0.00	0.62
G1 01P6	2001-2003	maïs	302	51	173	500	114	4.00E-08	6.55E-04	0.000	0.00	6.80	5.33	10.01	5.74
G1 08P41	1997-1999	néant	295	37	159	750	107	0.00E+00	9.69E-05	0.000	0.00	0.28	0.06	4.58	0.10
G1 08P41	1999-2001	maïs	301	25	147	500	89	6.44E-08	3.09E-04	0.000	0.00	0.01	0.13	0.02	0.11
G1 08P41	2002-2003	maïs	304	38	160	750	99	5.26E-04	5.26E-04	0.008		0.93	0.93	1.63	
G1 08P41	2003-2005	herbe	276	344	466	1050	433	3.14E-01	0.00E+00	16.556		7.61	0.72	20.53	2.96
G1 09P3	1998-2000	néant	309	32	154	1000	88	0.00E+00	1.77E-04	0.000	0.00	8.15	0.46	45.64	2.13
G1 09P3	2000-2002	maïs	310	53	175	1000	108	9.88E-01	2.91E-04	21.564	0.02	4.36	0.29	8.59	1.31
G1 09P3	2002-2004	herbe	294	44	166	1000	115	6.72E-03	6.50E-05	7.207	0.00	0.20	0.06	0.43	0.16
G1 09P3	2005-2006	herbe	311	94	216	900	148	0.00E+00	7.54E-03	0.000		0.00	0.29	0.02	
G2 03P3	1997-1999	néant	309	60	182	1000	116	0.00E+00	1.92E-03	0.000	0.01	0.11	0.05	3.35	0.25
G2 03P3	1999-2001	maïs	309	70	192	1000	126	4.30E-07	2.40E-03		0.00	0.05	0.05	0.24	0.21
G2 03P3	2001-2003	maïs	317	317	439	1000	365	7.18E+00	2.60E-04	105.920	0.00	0.43	0.08	2.57	0.56
G2 03P3	2004-2006	maïs	309	51	173	600	107	0.00E+00	1.67E-03	0.000	0.02	0.00	0.00		0.01
G2 13P1	1997-1999	néant	301	33	155	1000	97	0.00E+00	1.17E-03	0.000	0.00	0.04	0.02	1.34	0.10
G2 13P1	1999-2001	maïs	294	20	142	1100	91	1.50E-03	1.49E-03		0.00	0.61	0.28	3.72	1.26
G2 13P1	2002-2004	herbe	301	41	163	1400	105	1.60E+01	5.00E-04	2827.205	0.00	0.36	0.21	3.13	1.63
G2 13P1	2004-2005	maïs	306	31	153	1100	90	0.00E+00	0.00E+00	0.000		0.00	0.03	0.24	
G3 03P3	1997-1999	néant	309	60	182	1000	116	0.00E+00	5.10E-04	0.000	0.01	0.40	0.07	12.66	0.19
G3 03P3	1999-2001	maïs	309	70	192	1000	126	1.17E-07	1.33E-03	0.000	0.00	0.01	0.04	0.02	0.09
G3 03P3	2001-2003	maïs	317	317	439	1000	365	5.00E-08	6.26E-05	0.000	0.00	1.55	0.08	8.43	0.31
G3 03P3	2004-2006	maïs	309	51	173	600	107	0.00E+00	9.22E-04	0.000	0.03	0.00	0.02	-0.08	0.08

Annexe 16 : Plan d'expérience Isoproturon

Description des 3 niveaux des facteurs expérimentaux :

	-1	0	+1
Climat de l'année	sec	moyen	humide
Climat de l'année antérieure	sec	moyen	humide
Type de sol	G1	G2	G3

Année de traitement	Année antérieure traitement	Type de sol	Percolation	Ruisselleme nt	ETR	Pourcentage soluté percolé ann1	Pourcentage soluté percolé ann2	Concentration moyenne ruisselé 1	Concentration moyenne ruisselé 2	Pourcentage soluté ruiss annee1	Pourcentage soluté ruiss annee2	Concentration moyenne percolé 1	Concentration moyenne percolé 2
			mm	mm	mm	%	%	mg/m ²	mg/m ²	%	%	mg/m ²	mg/m ²
-1	0	0	315.999	5.2444	1081.681	0	0.00020269	0	0.038647891	0.698276	0.057085	16.30549522	0.256215935
0	0	1	372.893	27.6876	1076.844	0	0.00058792	0	0.04246726	2.21161	0.33465	84.11622653	1.733085793
0	0	-1	374.335	31.2117	1071.86	0	0.00064521	0	0.041343778	2.50732	0.16318	72.10364275	0.873079295
0	1	-1	389.136	31.945	1071.804	0	0.0006452	0	0.041343137	2.50737	0.16319	72.10508143	0.873132928
0	-1	-1	400.561	31.7054	1065.452	0	0.00064521	0	0.041343458	2.50739	0.16319	72.1056569	0.873132928
0	1	0	409.654	10.191	1071.921	0	0.00021064	0	0.042381288	2.55374	0.18351	85.79766145	0.928601075
-1	1	-1	319.879	16.091	1082.414	0	0.00060263	0	0.037451432	0.39772	0.051699	9.052129138	0.242676229
0	-1	1	398.456	30.1147	1070.554	0	0.00058777	0	0.042455144	2.22095	0.33548	83.22256332	1.737448423
-1	0	1	302.45	16.2178	1084.264	0	0.00062181	0	0.038341144	0.365294	0.055168	11.91438803	0.251184319
1	1	-1	704.548	179.672	1067.674	0.755883	0.000179	16.53070463	0.010956053	3.50125	0.20381	22.22117785	1.010436338
1	1	1	586.549	295.551	1071.587	1.67369	0.00018	21.43777539	0.012167917	4.10892	0.21385	35.33354793	1.009691778
-1	1	1	329.473	5.245	1082.551	0	0.00020262	0	0.038631459	0.700495	0.05721	16.32569577	0.256768041
-1	-1	-1	332.497	16.091	1074.632	0	0.00060216	0	0.037422286	0.404736	0.052334	9.154624703	0.245650691
1	-1	-1	711.991	183.312	1061.422	0.755883	0.000179	16.53070463	0.010956053	3.50125	0.20381	22.22103672	1.010416253
1	0	1	582.691	282.9416	1070.794	1.67369	0.00018	21.43804998	0.012167917	4.10892	0.21385	35.33354793	1.009686795
1	0	-1	697.041	172.4269	1066.94	0.755883	0.000179	16.53106616	0.010956053	3.50125	0.20381	22.22103672	1.010411231
1	0	0	694.763	174.2942	1067.361	0.858765	6E-05	18.00534647	0.011492051	4.33405	0.20308	28.03865241	0.958942287
1	-1	0	710.708	183.03135	1061.882	0.858765	6E-05	18.00534647	0.011492051	4.33405	0.20308	28.03883382	0.958942287
1	-1	1	590.785	301.975	1065.374	1.67369	0.00018	21.43804998	0.012167917	4.10892	0.21385	35.33354793	1.009686795
-1	0	-1	305.262	16.0898	1081.56	0	0.00060282	0	0.037465972	0.39479	0.051422	9.008657316	0.241381907
-1	-1	1	327.387	19.7885	1077.454	0	0.00061904	0	0.038073609	0.406144	0.056279	12.72448095	0.255990787
0	-1	0	420.79	10.21615	1065.612	0	0.00021063	0	0.042388336	2.55371	0.18352	85.79665345	0.928601075
-1	1	1	318.713	16.252	1085.217	0	0.00061955	0	0.0381214	0.399636	0.056047	12.60741411	0.25498008
0	0	0	395.509	9.9382	1071.971	0	0.00021064	0	0.042388964	2.55374	0.18351	85.79766145	0.928605775
-1	-1	0	342.077	5.24469	1074.802	0	0.00020235	0	0.038582261	0.711435	0.057621	16.44949588	0.258605983
0	1	1	389.187	28.637	1076.857	0	0.0005878	0	0.042459116	2.21862	0.33527	83.38426603	1.736349588
1	1	0	703.32	179.351	1068.101	0.858765	6E-05	18.00534647	0.011492051	4.33405	0.20308	28.03847099	0.958951346

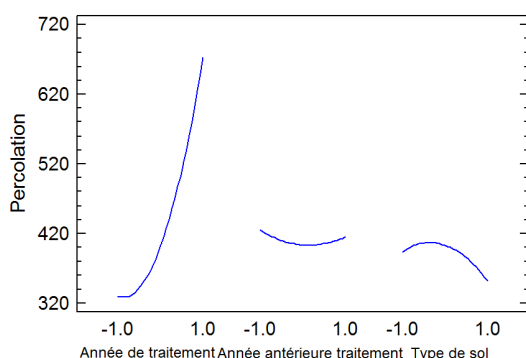
Annexe 17 : Plan d'expérience Atrazine et Sulcotrione

Description des 3 niveaux des facteurs expérimentaux :

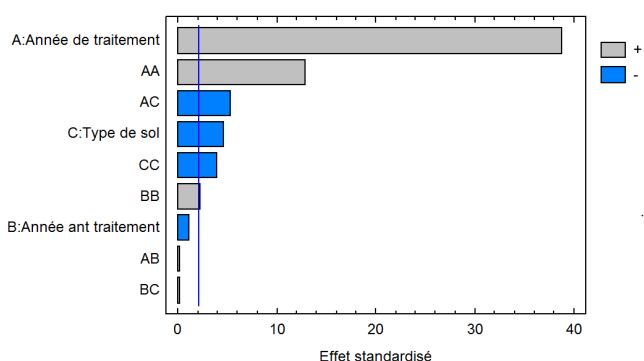
							-1		+1					
Pesticides							Atrazine		Sulcotrione					
Année ant	Année	Sol	pesticides	Percolation	Ruissellement	ETR	pourcentage soluté ruisselé 1	pourcentage soluté ruisselé 2	Concentration moyenne ruiss av été	Concentration moyenne ruiss ap été	pourcentage soluté percolé 1	pourcentage soluté percolé 2	Concentration moyenne perco av été	Concentration moyenne perco ap été
				mm	mm	mm	%	%	mg/m3	mg/m3	%	%	mg/m3	mg/m3
0	0	0	-1	542.845	25.3704	909.163	0	0.00502243	0	0.3959098	0	0.0578178	0	0.213322583
0	0	-1	-1	537.959	37.9488	901.482	0	0.00872481	0	0.45981765	0	0.0448934	0	0.168349625
-1	-1	1	1	433.278	48.7053	921.653	0	8.7748E-14	0	2.99169E-12	0.00100505	1.22E-08	0	3.27477E-06
1	0	0	1	543.635	25.053	910.53	0	8.4415E-15	0	6.65422E-13	0	5.9523E-08	0	2.19636E-07
0	-1	-1	-1	467.907	19.0135	914.062	0	0.0115159	0	0.605669656	0	0.0639958	0	0.236727309
1	0	1	1	509.179	54.642	916.911	0	1.722E-14	0	6.35695E-13	3.9506E-40	9.107E-09	0	3.58775E-08
-1	-1	0	-1	470.284	16.9234	915.24	0	0.00792693	0	0.503856664	0	0.0668856	0	0.243421148
1	1	1	-1	666.641	345.11	927.991	12.1527	0.0072	1408.355545	0.261305074	0	0.29504	0	1.146234007
-1	1	0	1	803.857	219.796	914.21	0	4.9598E-15	0	4.00838E-13	8.57492	0.00063	213.270154	0.002281005
1	-1	-1	-1	489.224	19.014	916.878	0	0.0115158	0	0.60564847	0	0.0639959	0	0.23673031
-1	1	0	-1	543.635	25.053	910.53	0	0.00502249	0	0.395608088	0	0.0578177	0	0.213319853
0	-1	1	1	426.685	46.8791	927.402	0	8.7748E-14	0	2.99168E-12	0.00100505	1.22E-08	0	3.27476E-06
0	0	-1	1	530.887	39.5097	906.944	0	1.3769E-14	0	6.96988E-13	0	2.6402E-09	0	1.00444E-08
1	1	1	-1	819.424	209.734	911.168	0	0.00618966	0	0.319383901	2.20905	0.3116	63.82397221	1.152165823
-1	1	-1	-1	813.648	212.559	910.263	0	8.4825E-15	0	4.22816E-13	9.47862	0.0007	202.810319	0.002461916
-1	0	-1	-1	541.875	37.995	896.122	0	0.00872473	0	0.459813434	0	0.0448938	0	0.168350632
0	-1	-1	1	461.25	19.8444	919.834	0	7.1556E-14	0	3.60583E-12	0	4.1643E-08	0	1.55298E-07
0	0	1	-1	507.663	54.175	915.542	0	0.0112913	0	0.416839253	0	0.0343373	0	0.134198998
-1	-1	-1	-1	472.625	19.0137	907.952	0	0.0115162	0	0.605679063	0	0.0639953	0	0.236725457
0	0	1	1	507.663	54.1749	915.542	0	1.722E-14	0	6.35699E-13	3.9578E-40	9.1078E-09	0	3.58804E-08
0	1	1	-1	665.941	344.392	926.052	12.1527	0.0072	1408.355545	0.261305074	0	0.295041	0	1.146260941
0	1	1	1	665.94	344.392	926.052	8.47527	0	982.0706837	0	4.12764	0.00077	120.7845561	0.001762322
0	1	0	1	799.631	217.7982	918.953	0	4.9598E-15	0	4.00838E-13	8.57492	0.00063	213.2648493	0.002281039
-1	-1	1	-1	433.277	48.7054	921.573	0	0.0149249	0	0.508966439	0	0.0408742	0	0.156234397
-1	-1	0	1	470.285	16.9239	915.24	0	5.3431E-14	0	3.3962E-12	0	7.1707E-07	0	2.60997E-06
-1	1	1	1	669.875	347.8375	921.333	8.47527	0	982.1844941	0	4.12764	0.00077	120.7845561	0.001762322
1	1	1	1	666.641	345.11	927.991	8.47527	0	982.1844941	0	4.12764	0.00077	120.7845561	0.001762349
1	0	1	-1	509.179	54.642	916.911	0	0.0112912	0	0.416834022	0	0.0343372	0	0.134195846
-1	0	1	1	513.48	56.4483	910.113	0	1.722E-14	0	6.35707E-13	3.9476E-40	9.1063E-09	0	3.58748E-08
1	0	-1	1	532.028	39.816	908.304	0	1.3769E-14	0	6.96983E-13	0	2.6402E-09	0	1.00444E-08
1	-1	1	-1	427.12	47.106	930.101	0	0.0149245	0	0.508847596	0	0.0408745	0	0.1562415
-1	-1	-1	1	467.473	19.8444	913.743	0	7.1553E-14	0	3.60569E-12	0	4.1643E-08	0	1.553E-07
0	-1	1	-1	426.685	46.8791	927.402	0	0.0149244	0	0.508849392	0	0.0408744	0	0.156238033
-1	1	1	-1	669.875	347.8375	921.333	12.1527	0.0072	1408.355545	0.261295591	0	0.295038	0	1.146217862
1	-1	1	1	427.12	47.106	930.101	0	8.7748E-14	0	2.99168E-12	0.00100505	1.22E-08	0	3.27476E-06
0	1	-1	-1	818.565	208.499	909.332	0	0.00618968	0	0.319400382	2.20905	0.3116	63.8147344	1.152182974
1	1	-1	1	811.028	211.141	916.984	0	8.4825E-15	0	4.22816E-13	9.47862	0.0007	202.810319	0.002461841
0	-1	0	1	463.791	16.0558	921.113	0	5.3431E-14	0	3.39622E-12	0	7.1707E-07	0	2.60997E-06
1	-1	-1	1	461.348	19.844	922.554	0	7.1554E-14	0	3.60582E-12	0	4.1643E-08	0	1.55301E-07
-1	0	0	1	546.689	28.4733	903.7	0	8.4417E-15	0	6.65446E-13	0	5.9515E-08	0	2.19608E-07
0	0	0	1	542.845	25.3706	909.163	0	8.4418E-15	0	6.65444E-13	0	5.9518E-08	0	2.19618E-07
1	0	-1	-1	540.364	38.353	902.608	0	0.00872477	0	0.459827659	0	0.0448935	0	0.168351521
1	-1	0	-1	462.995	16	923.81	0	0.00792693	0	0.503840971	0	0.0668856	0	0.24342292
0	-1	0	-1	463.79	16.0558	921.113	0	0.00792693	0	0.503860187	0	0.0668856	0	0.243421148
-1	1	0	-1	799.475	217.848	920.89	0	0.00339436	0	0.274358228	2.34415	0.62916	86.63179298	2.31317145
-1	0	-1	1	536.421	39.6115	901.433	0	1.3769E-14	0	6.96978E-13	0	2.6403E-09	0	1.00449E-08
0	1	-1	1	810.811	210.4829	915.044	0	8.4825E-15	0	4.22795E-13	9.47862	0.0007	202.814661	0.002461925
1	1	0	1	799.475	217.849	920.89	0	4.9598E-15	0	4.00838E-13	8.57492	0.00063	213.2860697	0.002281089
0	1	0	-1	799.63	217.7982	918.953	0	0.00339436	0	0.274336054	2.34415	0.62916	86.63819876	2.313128998
1	0	0	-1	803.867	219.796	914.21	0	0.00339436	0	0.274336054	2.34415	0.62916	86.63819876	2.313086347
-1	0	0	-1	546.689	28.4732	903.7	0	0.00502246	0	0.395911965	0	0.0578179	0	0.213322952
1	-1	0	1	462.995	16	923.81	0	5.3431E-14	0	3.3961E-12	0	7.1707E-07	0	2.60999E-06
-1	0	1	-1	513.481	56.4483	910.113	0	0.0112912	0	0.416835561	0	0.034337	0	0.134197816
-1	1	-1	-1	820.923	209.405	904.672	0	0.00618968	0	0.319400382	2.20905	0.3116	63.8147344	1.152174398

Annexe 18 : Résultats plan d'expérience Isoproturon

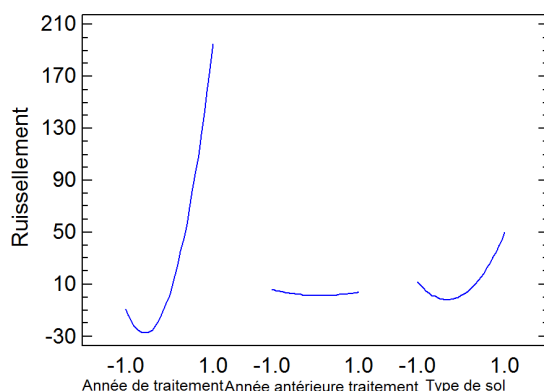
Graphique des effets directs pour Percolation



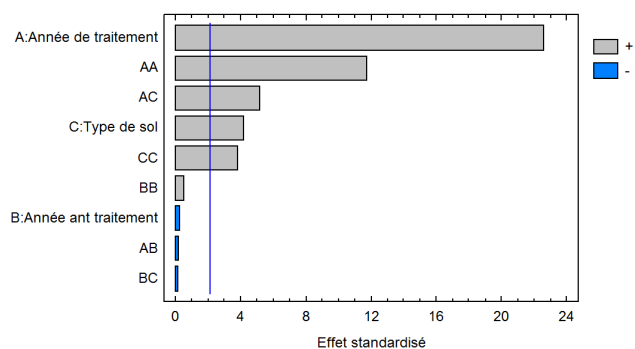
Graphique de Pareto standardisé pour Percolation



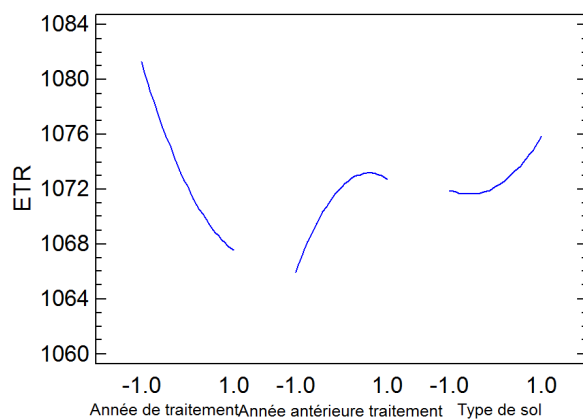
Graphique des effets directs pour Ruissellement



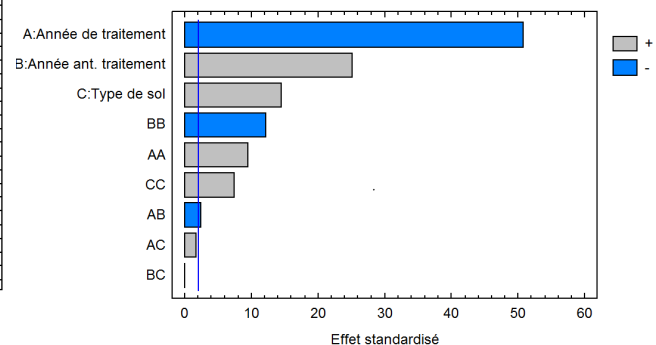
Graphique de Pareto standardisé pour Ruissellement



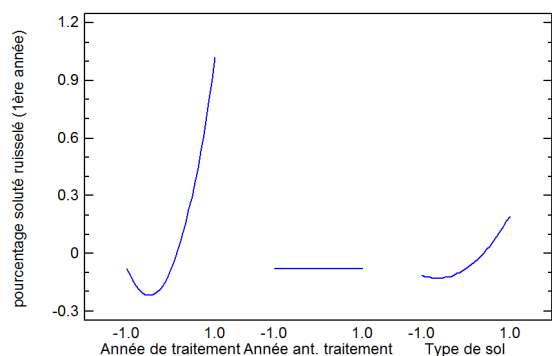
Graphique des effets directs pour ETR



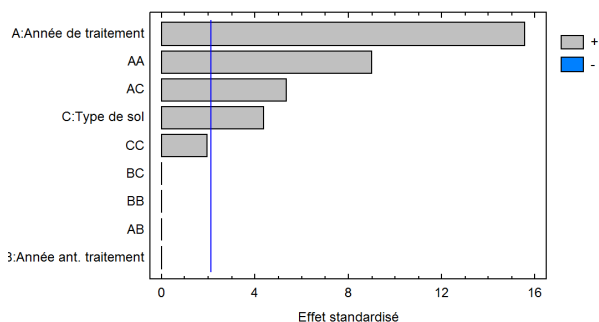
Graphique de Pareto standardisé pour ETR



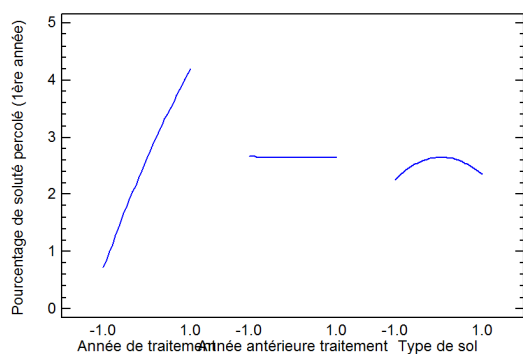
Graphique des effets directs pour pourcentage soluté ruisselé (1ère année)



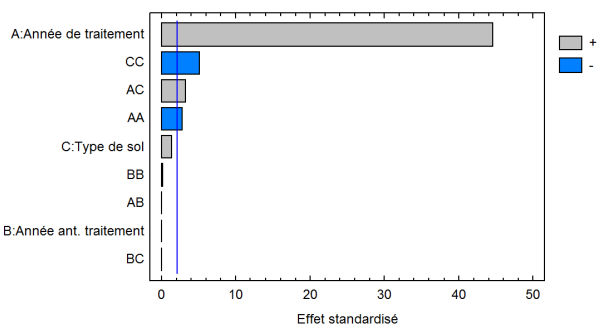
Graphique de Pareto standardisé pour pourcentage soluté ruisselé (1ère année)



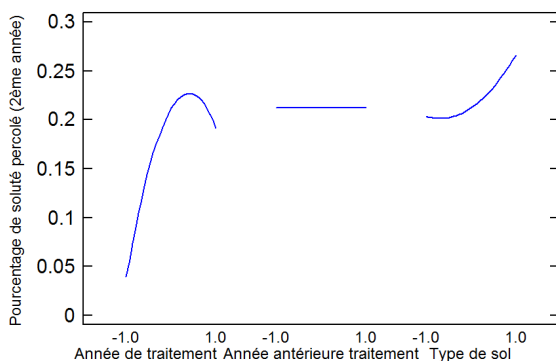
Graphique des effets directs pour pourcentage de soluté percolé (1ère année)



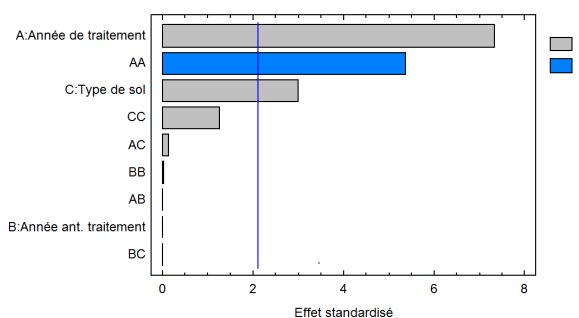
Graphique de Pareto standardisé pour pourcentage de soluté percolé (1ère année)



Graphique des effets directs pour pourcentage de soluté percolé (2ème année)

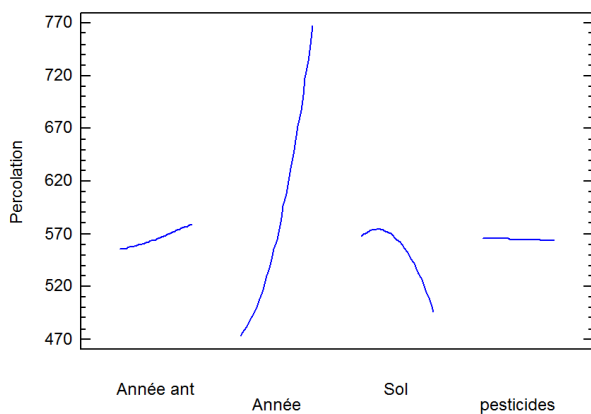


Graphique de Pareto standardisé pour pourcentage de soluté percolé (2ème année)

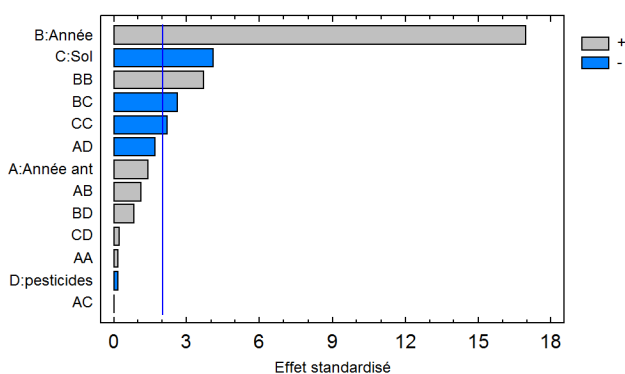


Annexe 19 : Résultats plan expérience Atrazine et Sulcotrione

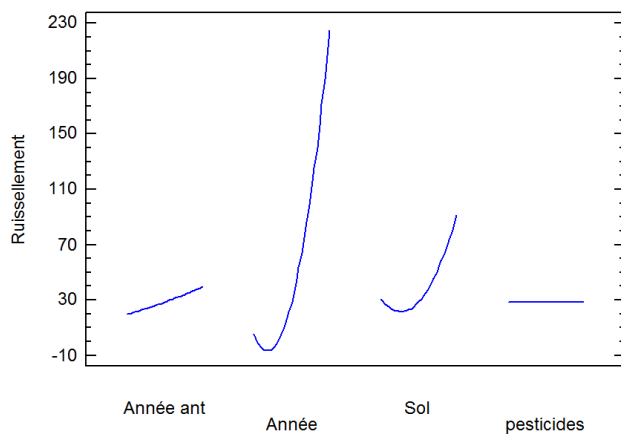
Graphique des effets directs pour Percolation



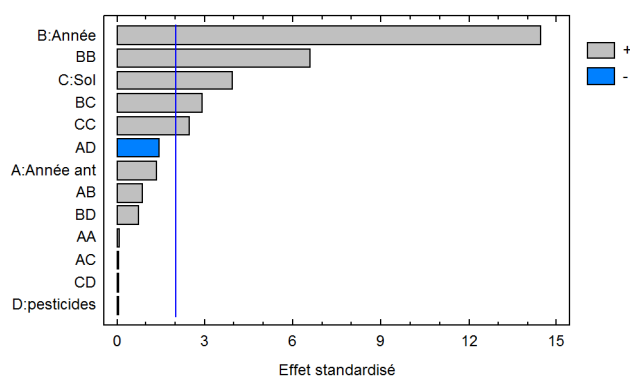
Graphique de Pareto standardisé pour Percolation



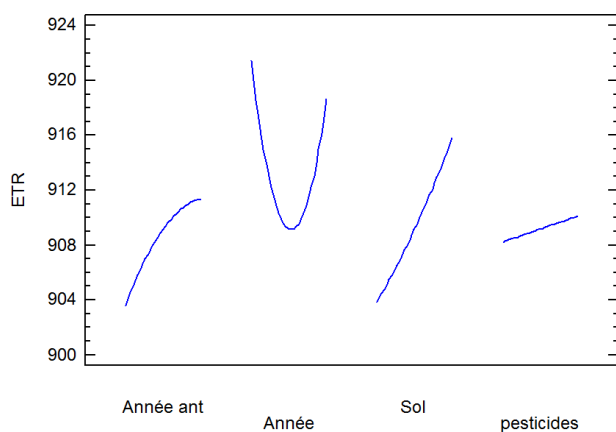
Graphique des effets directs pour Ruissellement



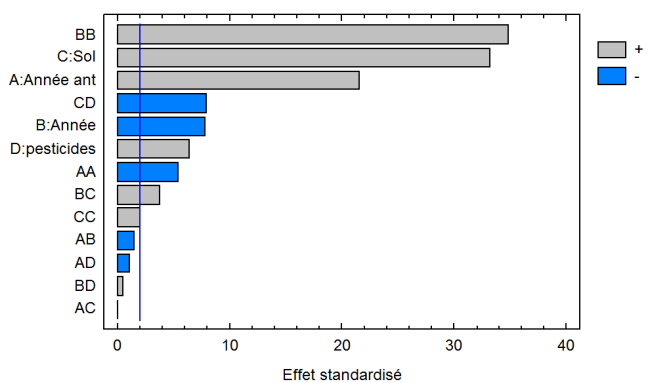
Graphique de Pareto standardisé pour Ruissellement



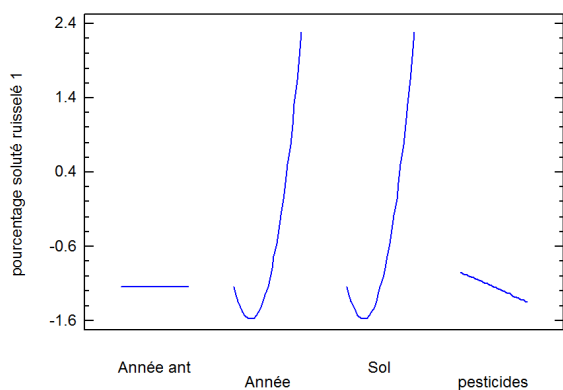
Graphique des effets directs pour ETR



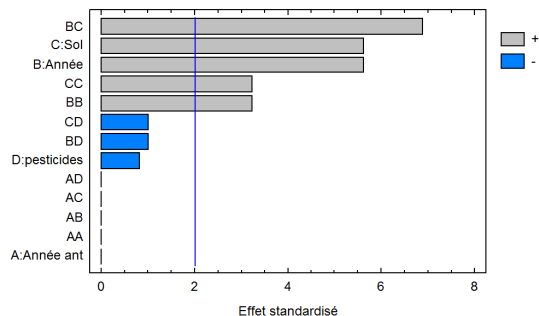
Graphique de Pareto standardisé pour ETR



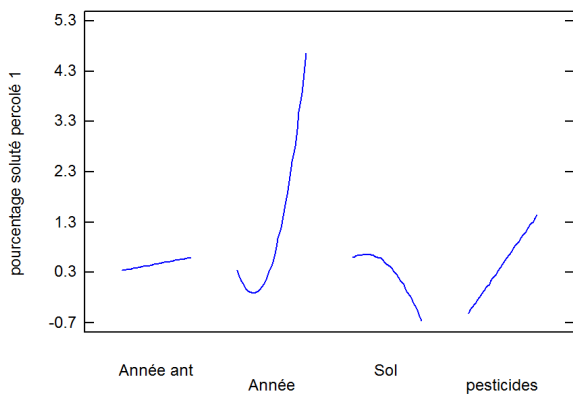
Graphique des effets directs pour pourcentage de soluté ruisselé 1ère année



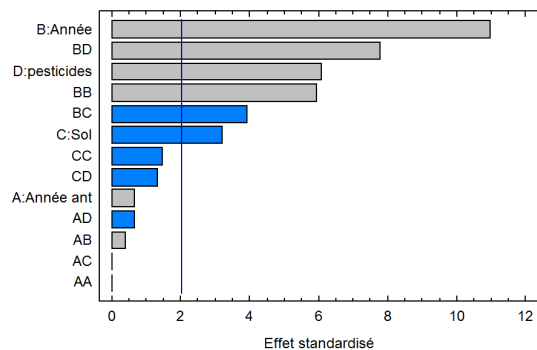
Graphique de Pareto standardisé pour pourcentage de soluté ruisselé 1ère année



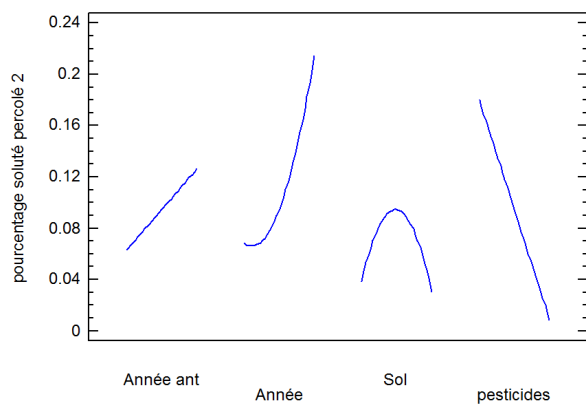
Graphique des effets directs pour pourcentage de soluté percolé 1ère année



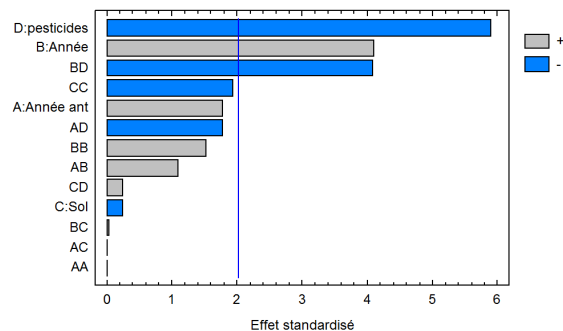
Graphique de Pareto standardisé pour pourcentage de soluté percolé 1ère année



Graphique des effets directs pour pourcentage de soluté percolé 2ème année



Graphique de Pareto standardisé pour pourcentage de soluté percolé 2ème année



Annexe 20 : Plan d'expérience avec les différents type de traitement

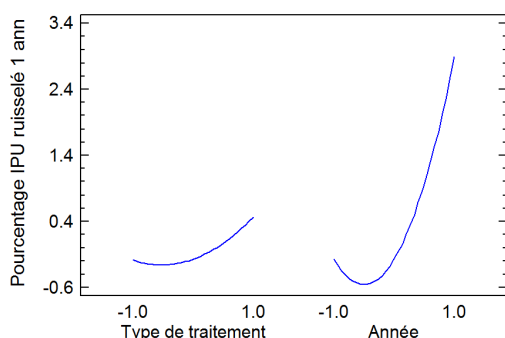
Description des niveaux des facteurs expérimentaux :

	-1	-0.33	+0.33	+1
Type de traitement	Pré levée (jour du semis)	Pré levée (jour du semis +10 jours)	Post levée tardive (Date réelle -10 jours)	Post levée tardive (Date réelle)

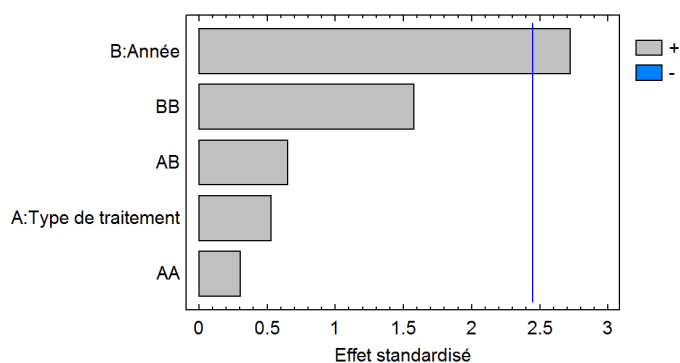
Type de traitement	Année	Percolation	Ruissellement	ETR	Pourcentage IPU ruisselé 1 ann	Pourcentage IPU ruisselé 2 ann	Pourcentage IPU percolé 1 ann	Pourcentage IPU percolé 2 ann
semis ou date réelle		mm	mm	mm	%	%	%	%
1.00	-1	305.463	16.0898	1081.56	0	0.00032306	0.21016	0.039958
0.33	-1	305.262	16.0898	1081.56	0	0.00010277	0.0325776	0.0021984
-1.00	0	374.339	31.2113	1071.86	0	4.1618E-05	0.958722	0.205378
0.33	0	374.338	31.2114	1071.86	0	0.00036173	0.733675	0.037828
-1.00	1	696.938	172.5309	1066.94	1.65305	1E-05	30.7215	0.7115
-0.33	0	374.339	31.2113	1071.86	0	6.7435E-05	1.06931	0.06179
-0.33	1	696.917	172.5519	1066.94	4.85864	2E-05	24.9107	0.6856
0.33	1	697.045	172.4229	1066.94	0.428096	0.000125	1.84029	0.09367
-1.00	-1	305.264	16.0893	1081.56	0	4.2893E-05	0.0408051	0.0239457
-0.33	-1	370.512	17.0425	1015.36	0	5.3883E-05	0.567613	0.057424
1.00	1	697.064	172.6039	1066.94	5.30255	0.00017	26.9159	0.8283
1.00	0	374.537	31.2113	1071.86	0	0.00026064	4.2918	0.44138

Annexe 21 : Résultats du plan d'expérience pour différents types de traitement

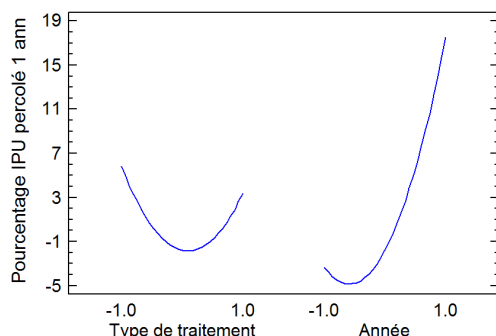
Graphique des effets directs pour Pourcentage d'IPU ruisselé la 1ère année



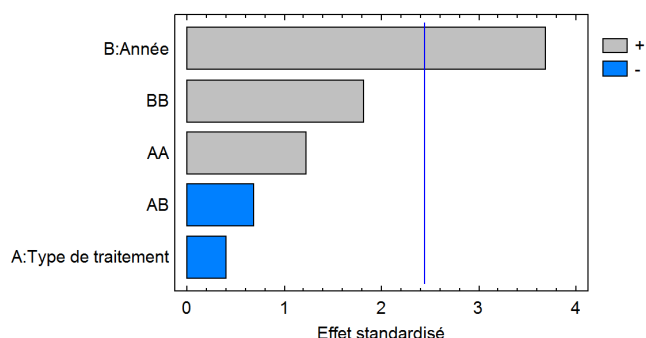
Graphique de Pareto standardisé pour Pourcentage d'IPU ruisselé la 1ère année



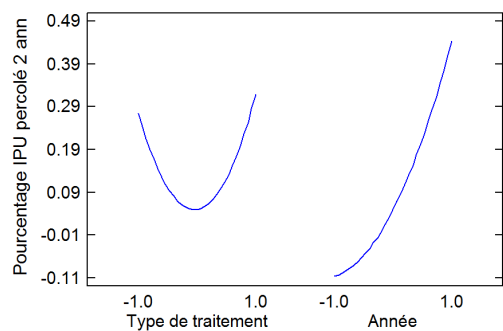
Graphique des effets directs pour Pourcentage d'IPU percolé la 1ère année



Graphique de Pareto standardisé pour Pourcentage d'IPU percolé la 1ère année



Graphique des effets directs pour Pourcentage d'IPU percolé la 2ème année



Graphique de Pareto standardisé pour Pourcentage d'IPU percolé la 2ème année

