



HAL
open science

Modélisation hydrologique d'un bassin versant en vue de l'étude des transferts de pesticides : cas du bassin versant du Ruiné (Charente)

Séverine Lesclaux

► To cite this version:

Séverine Lesclaux. Modélisation hydrologique d'un bassin versant en vue de l'étude des transferts de pesticides : cas du bassin versant du Ruiné (Charente). Sciences de l'environnement. 2002. hal-03806130

HAL Id: hal-03806130

<https://hal.inrae.fr/hal-03806130>

Submitted on 7 Oct 2022

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

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



Université de Bretagne Sud
Campus Tohannic
rue Yves Mainguy
56 000 Vannes



Modélisation hydrologique d'un bassin versant en vue de l'étude des transferts de pesticides.

*Cas du bassin versant du Ruiné
(Charente)*

LESCLAUX Séverine

Encadrement : JF.Dubernet et Y. Legat

Département Equipements pour l'Eau et l'Environnement
Unité Qualité des Eaux

Groupement de Bordeaux

50, avenue de Verdun

Gazinet

33612 Cestas Cedex

Tél : 05 57 89 08 00 - Fax : 05 57 89 08 01

Septembre 2002

RESUME

Pour concilier la protection de l'environnement et les exigences des pratiques agricoles, il est important d'acquérir une compréhension suffisante des paramètres qui gouvernent le transfert des polluants afin de mettre en œuvre des pratiques correctives et de s'assurer de leur efficacité. L'étude des transferts de substances phytosanitaires pose de grandes difficultés liées à la compréhension du comportement hydrologique du bassin. L'influence des pluies est considérable. Les flux de pesticides les plus importants accompagnent, en général, des épisodes de fortes précipitations.

L'analyse des données a donc consisté, dans un premier temps, à modéliser le débit du Ruiné en fonction des données de pluie et d'ETP. Dans un second temps, il s'agit de greffer sur ce modèle hydrologique, les apports de pesticides et de modéliser leurs dégradation et migration en connaissance des mécanismes biologiques et physiques dans le sol et des taux de pesticides retrouvés dans le cours d'eau.

L'étude présentée ici aborde le problème de la pollution par les pesticides à l'échelle du bassin versant. Le bassin versant du Ruiné, en Charente, est suivi depuis 1991 sur le plan des pratiques phytosanitaires, des paramètres climatiques et hydrologiques et des concentrations en pesticides dans le cours d'eau.

Je tiens à remercier :

Jean François Dubernet, mon maître de stage, pour son expérience en agronomie et nos échanges stimulants ce travail.

Yves Legat de m'avoir accompagnée tout au long de ce stage. Merci pour ses connaissances et sa capacité d'écoute.

L'ensemble de l'unité qui ont rendu ce stage agréable et particulièrement François Delmas pour m'avoir accueillie dans son unité.

Dominique Drouet pour ses indispensables corrections et son encouragement.

SOMMAIRE

Tables des illustrations	3
Introduction	6
1. Synthèse bibliographique	7
1.1 Genèse des débits	8
a) Précipitations et évapotranspiration	8
b) Propriétés hydriques du milieu et variabilité spatio-temporelle du bassin	9
1.2 Dispersion des produits phytosanitaires	9
a) Rétention ou sorption : coefficient de partage carbone organique/eau (Koc) :	10
b) Dégradation	10
c) Volatilisation	11
1.3 Les pesticides	11
2. Contexte de l'étude : le bassin versant du Ruiné	13
2.1 Situation géographique et climat	13
2.2 Dispositif expérimental et acquisition des données	14
a) Données de pluie et débit	14
b) Evapotranspiration potentielle (ETP)	14
c) Paramètres de qualité de l'eau	14
d) Pratiques culturales	15
3. Constitution des bases de données	15
3.1 La base de données 'hydro'	15
3.2 La base de données 'phyto'	16
4. Analyse descriptive des données	16
4.1 Analyse univariée des données d'hydrologie	16
a) Variable débit	16
b) Variable pluie	18
c) Variable ETP (évapotranspiration potentielle)	19
4.2 Analyse bivariée des données d'hydrologie	20
4.3 Analyse des données phyto	21

5. Modélisations	23
5.1 Modèle pluie-débit	23
a) Structure du modèle.....	23
b) Programmation sous SAS.....	25
c) Hypothèses du modèle.....	28
5.2 Modélisation du flux de pesticides	29
6. Résultats et interprétation.....	30
6.1 Estimation des paramètres	30
6.2 Sensibilité du modèle	30
7. Discussion et perspectives.....	33
7.1 Imprécisions des données	33
7.2 Notions non exploitées	33
7.3 Données non exploitées.....	34
Conclusion	35
Glossaire	36
Références bibliographiques	37

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant.	7
Figure 2 : Précipitations et évapotranspiration intervenants dans la formation des débits.....	8
Figure 3 : Devenir des pesticides dans l'environnement.	9
Figure 4 : Processus hydrologique de transfert des pesticides dans les eaux de surface.....	10
Figure 5 : Dégradation de la simazine et de l'atrazine en DEA et DIA.....	11
Figure 6 : Localisation du domaine d'étude.	13
Figure 7 : Evolution au cours du temps du débit mensuel.....	17
Figure 8 : Régression polynomiale du débit mensuel moyen.....	17
Figure 9 : Caractéristiques de la distribution des hauteurs de pluie.	18
Figure 10 : Tendance de l'ETP mensuelle moyenne.....	20
Figure 11 : Illustration de la relation pluie / débit	20
Figure 12 : Exemple de mobilisation d'Atrazine, DEA et DIA lors d'une crue.	22
Figure 13 :Schématisation du bassin versant.....	24
Figure 14 : Structure du modèle hydrologique	26
Figure 15 : Distribution des paramètres du ruissellement décalé dans le temps.	28
Figure 16 : Modèle conceptuel du transfert de pesticides	29
Tableau 1: Hauteurs de pluie annuelles.....	19
Tableau 2: Statistiques des hauteurs de pluies mensuelles.....	19
Tableau 3 : Corrélations des variables d'hydrologie.....	21
Tableau 4: Quantités d'Atrazine apportées par an (en kg).....	21
Tableau 5 : Statistiques des concentrations d'Atrazine, DEA et DIA.	22

INTRODUCTION

Bien que les risques de contaminations des milieux aquatiques par les produits phytosanitaires aient été évoqués dès la fin des années 70, leur prise en compte dans les programmes de surveillance n'apparaît en France qu'en 1989, à la suite de l'entrée en vigueur de la directive européenne sur l'eau potable limitant à 0,1 µg/l la concentration maximale de la plupart des matières actives. Depuis, les analyses dans les eaux de surface se sont généralisées.

En effet, les pratiques agricoles actuelles entraînent une forte consommation d'engrais et de pesticides. Le rôle des intrants agricoles dans la dégradation de la qualité des eaux n'est pas négligeable et leur transfert vers les eaux de surface et les eaux souterraines constitue un problème écologique préoccupant, car leur contamination menace la qualité des ressources en eau potable.

Les approches développées au sein de l'unité Qualité des eaux conjuguent des mesures et expérimentations pratiquées sur le terrain, en systèmes aquatiques naturels d'eaux douces de surface (lacs, rivières et bassins versants) ou sur stations d'épuration, et des investigations de laboratoire. (Cf. annexe 1 : Présentation de l'entreprise).

Mon travail s'inscrit dans les problématiques de gestion des écosystèmes aquatiques continentaux menées par le Cemagref et plus particulièrement par celles de l'unité 'Qualité des Eaux' notamment l'étude des pollutions diffuses d'origine agricole. Suite aux traitements phytosanitaires, des quantités non négligeables de produits sont retrouvés dans les eaux de surface entraînées, par les précipitations. Dans le but premier de comprendre la formation des flux de pesticides à l'échelle du bassin versant, le Cemagref a développé depuis 1991 des travaux d'acquisition de connaissances notamment sur le bassin versant du Ruiné. L'agriculture y tient une place prépondérante, voire exclusive, ce qui implique des apports réguliers de produits phytosanitaires sur les sols et en conséquence une pollution du cours d'eau. D'autre part, sa dimension moyenne permet une connaissance quasiment exhaustive de ses caractéristiques et des pratiques agricoles. Ces critères en font un parfait lieu d'étude des transferts de pesticides et de la mise en œuvre de pratiques correctives.

Après une revue de la bibliographie, notre approche s'est organisée en deux points : modélisation des chemins de l'eau puis du flux de pesticides. Cette démarche repose sur l'observation suivante : les flux de pesticides les plus importants accompagnent, en général, des épisodes de pluie engendrés par de fortes précipitations.

Ce travail fait appel à de nombreux termes d'agronomie, aussi un glossaire est proposé en fin de ce document.

1. Synthèse bibliographique

L'objectif de la recherche bibliographique est de réaliser un bilan des relations entre la pluie et le débit du cours d'eau dans un premier temps, et le comportement des pesticides dans le sol dans un second temps.

On admet ici que le bilan hydrologique d'un bassin versant est composé de 3 termes :

- les entrées : on ne considère que la pluie (pas la neige).
- les sorties : évaporation, évapotranspiration, pertes souterraines.
- les stocks : surface, zone aérée, nappes souterraines et cours d'eau.

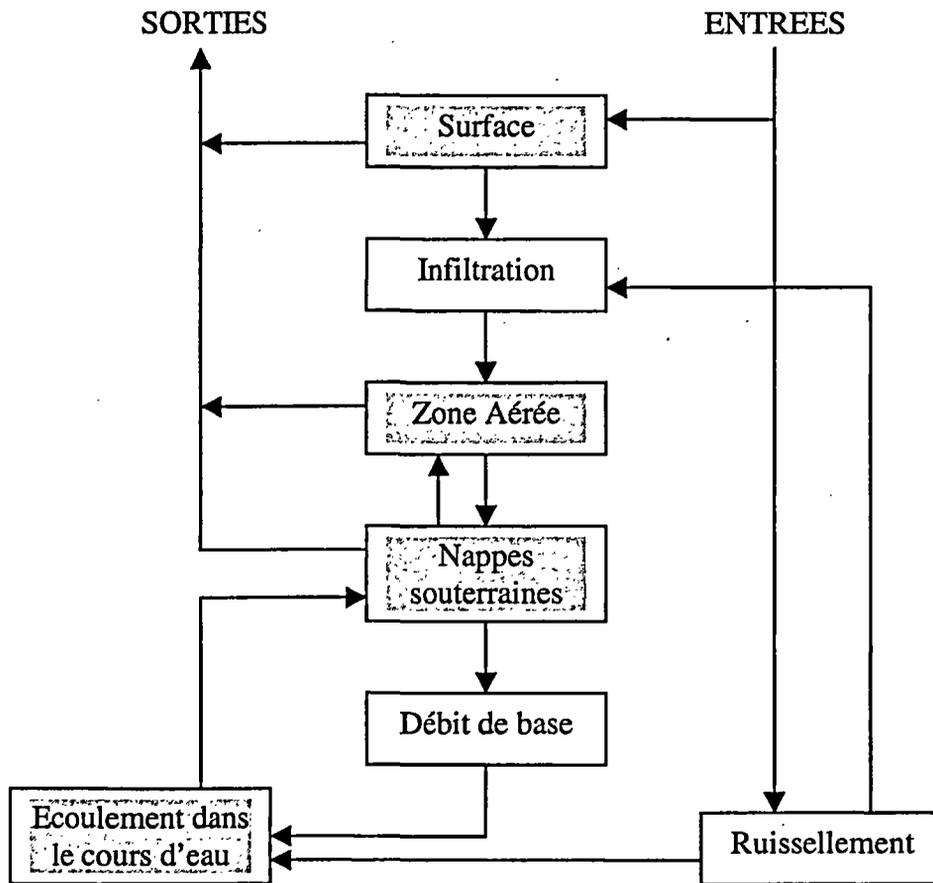


Figure 1 : Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant.

 En grisé stocks potentiels d'eau.

 En blanc, les mécanismes de transfert d'eau.

La figure 1 fournit une bonne représentation de l'imbrication des divers termes entre eux, bien qu'elle ne représente que les principaux termes et mouvements d'eau.

- Les variations de stocks dépendent de critères intrinsèques au système :
- la rétention d'eau dans la zone aérée est mesurée par le taux d'humidité du sol,
 - celle dans les nappes phréatiques dépend de la profondeur de la nappe,
 - les écoulements vers le cours d'eau sont fonction du niveau d'eau dans le sol.

Le sol se comporte comme un réservoir qui se remplit et se vide dans d'autres réservoirs. La surface du sol accumule de l'eau avant de se vider plus en profondeur puis dans les nappes et le cours d'eau. Cette chaîne de mécanismes est très liée aux caractéristiques structurales du sol et à la pluviométrie.

1.1 Genèse des débits

Ce paragraphe est fortement inspiré d'un article de B. Ambroise publié en 1998 dans la revue des sciences de l'eau. (Cf. références bibliographiques p.36).

Les débits sont générés le plus souvent par plusieurs processus superficiels et souterrains, simultanément ou successivement, dans des combinaisons très variables dans le temps et dans l'espace. De nombreux facteurs interviennent dans la genèse des débits :

a) Précipitations et évapotranspiration

L'apport d'eau à un bassin est essentiellement constitué par les précipitations. La pluviométrie doit être considérée sous plusieurs aspects, à la fois dans son intensité et dans sa distribution dans le temps. Pour un événement pluvieux donné, la réponse du bassin dépend du volume total de l'apport, de son intensité généralement très variable, de sa durée mais aussi de son positionnement par rapport à d'autres événements pluvieux. L'eau de pluie se concentre le long des versants du bassin et rejoint le cours d'eau par ruissellement ou après infiltration dans le sol.

L'évapotranspiration, prélèvement direct vers l'atmosphère d'une partie importante des précipitations diminue à long terme le volume drainé via les sols et les nappes, et accélère le tarissement des réserves du bassin.

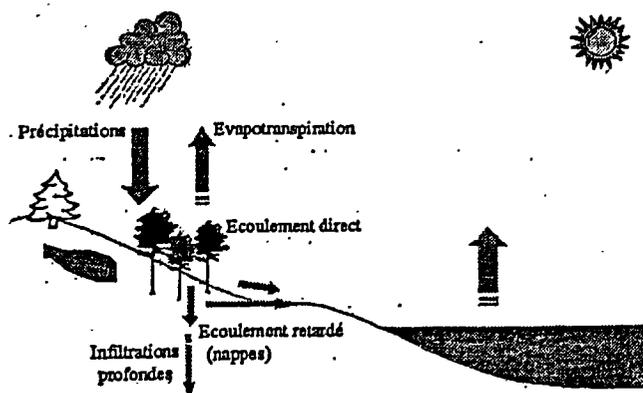


Figure 2 : Précipitations et évapotranspiration intervenant dans la formation des débits.

b) Propriétés hydriques du milieu et variabilité spatio-temporelle du bassin

À un même apport d'eau et d'énergie ne correspond pas forcément la même réponse en débit. Celle-ci dépend aussi largement de l'état hydrique et hydrologique initial du bassin, contrôlé par les intensités, durées, fréquences et séquences des épisodes pluvieux et évaporant précédents.

En effet, sur sol sec se forme une croûte imperméable nommée croûte de battance de telle sorte que le partage des eaux de pluie au niveau de la surface est plus favorable au ruissellement qu'à l'infiltration, ceci selon l'intensité de la pluie.

Les types de végétation (densité, morphologie, indice foliaire) et de sols (rugosité de surface, structure et texture), leur organisation spatiale dans le bassin, constituent ainsi des facteurs importants à caractériser.

1.2 *Dispersion des produits phytosanitaires*

Ce paragraphe est la synthèse de plusieurs documents dont notamment le mémoire de DESS de L. GUTZLER L. réalisé en 1998 au CEMAGREF de Bordeaux.

Les termes de « produits phytosanitaires » ou « pesticides » regroupent un grand nombre de substances destinées à lutter contre divers parasites des cultures. Leur classification est fondée sur la cible visée par le traitement : mauvaises herbes (herbicides), insectes (insecticides) et champignons (fongicides).

Les processus gouvernant le devenir de ces produits dans les différents compartiments de l'environnement sont divers : rétention par la matière organique (adsorption et désorption), dégradation par la flore bactérienne du sol, volatilisation, ...

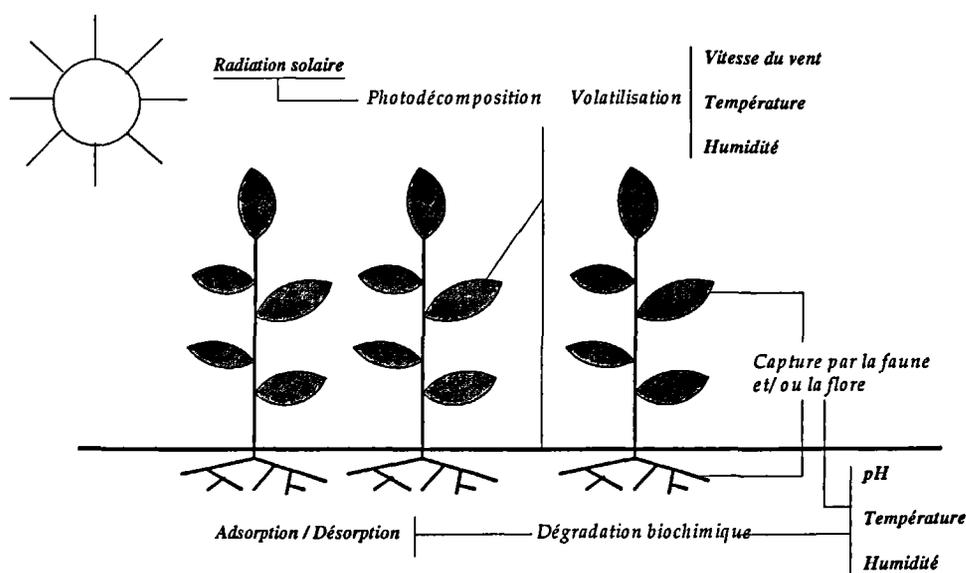


Figure 3 : Devenir des pesticides dans l'environnement.

Le transport des produits dans le sol est aussi « étroitement lié aux conditions pluviométriques et évapotranspiratoires des quelques jours qui suivent l'application » (Guillet et al.) : transfert par infiltration et ruissellement.

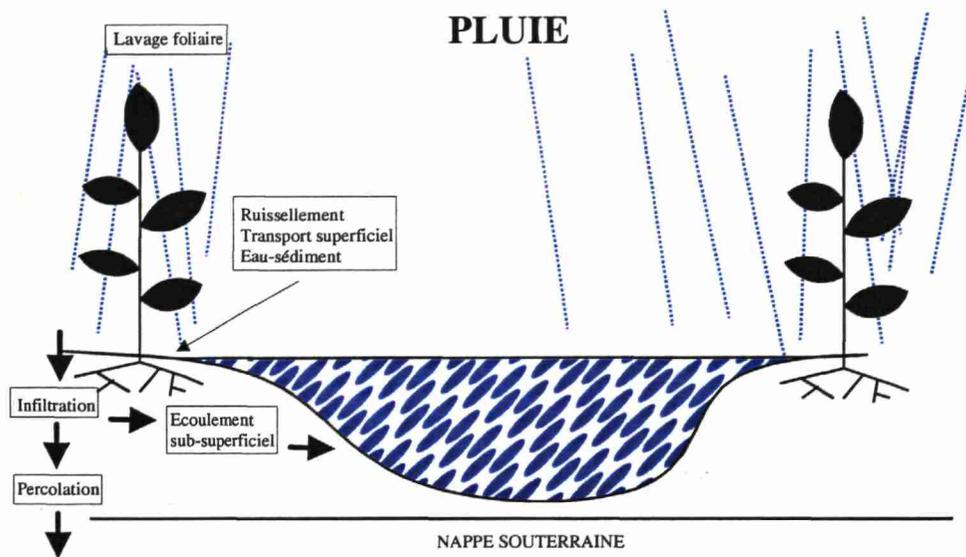


Figure 4 : Processus hydrologique de transfert des pesticides dans les eaux de surface.

a) Rétention ou sorption : coefficient de partage carbone organique/eau (K_{oc}) :

Les produits phytosanitaires sont plus ou moins entraînés par l'eau selon leur affinité à la matière organique. En effet, l'eau doit 'arracher' les produits du sol. Le transit des pesticides via l'eau est le plus rapide lorsque les produits sont en solution dans une eau en mouvement.

Le K_{oc} est la forme normalisée de la constante de sorption (K_d) rapportée au carbone organique du sol (C_{osol}) et reflète l'affinité du produit pour la matière organique.

$$K_{oc} = K_d / C_{osol}$$

Le coefficient K_d , exprimé en cm^3 / g , est un coefficient de distribution sol / eau mesuré expérimentalement, il s'agit de la concentration en pesticides adsorbée sur le substrat par rapport à la concentration en pesticides en solution.

C_{osol} est le pourcentage de carbone organique du sol utilisé pour cette mesure.

Le K_{oc} est une grandeur relativement indépendante du sol qui permet de comparer les produits entre eux.

b) Dégradation

La dégradation par les micro-organismes représente le mode de dégradation prédominant dans le sol. La dégradation activée par l'énergie lumineuse affecte les produits situés dans l'atmosphère et à la surface du sol, de l'eau et des végétaux. Enfin, la dégradation chimique s'effectue dans le sol à la surface des argiles et de la matière organique.

La persistance d'un produit dans le sol est un paramètre mesurable qui rend compte de sa cinétique de disparition, essentiellement par dégradation. Elle peut s'exprimer sous forme de demi-vie ou période nécessaire à la dégradation de la moitié de la quantité appliquée.

Les résultats sont très dépendants des conditions du milieu testé et présentent une très grande variabilité.

c) Volatilisation

La volatilisation d'un produit peut être appréciée par la valeur de sa constante de Henry. Elle représente le rapport, à l'équilibre, entre la fraction molaire du produit dans l'air et sa fraction molaire dans l'eau. Il s'agit donc d'un coefficient de partage air / eau.

Les composés dont la constante de Henry est inférieure à 10^{-5} sont peu susceptibles de se volatiliser.

1.3 Les pesticides

De nombreux pesticides sont dispersés sur le bassin versant du Ruiné, en particulier deux grandes familles de désherbants : les triazines (Atrazine et Simazine), les phényl-urées (Diuron, isotroturon, linuron).

Ce sont des herbicides sélectifs qui détruisent les mauvaises herbes tout en préservant la culture par opposition aux herbicides non sélectifs qui détruisent toute végétation présente.

➤ Exemple de l'atrazine

L'atrazine est un désherbant utilisé sur le maïs. Les mesures de concentrations en produits phytosanitaires effectuées à l'exutoire du bassin versant ont montré que les produits de dégradation, la déséthylatrazine (DEA) et la désisopropylatrazine (DIA), étaient présents dans les eaux. En terme de flux, ils représentent des quantités souvent aussi importantes que les molécules mères [3]. Si la DEA provient uniquement de l'atrazine, la DIA peut provenir d'un certain nombre d'autres triazines et en particulier de la simazine.

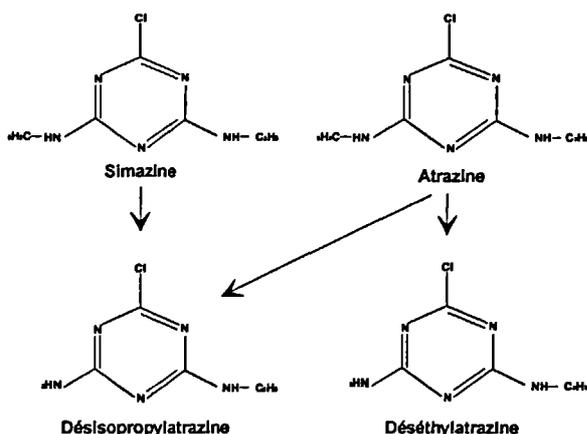


Figure 5 : Dégradation de la simazine et de l'atrazine en DEA et DIA

Cependant, il apparaît possible de faire la part de la désisopropylatrazine provenant de la simazine et de l'atrazine [3] mais notre étude se limitera à la dispersion de molécule mère et de DEA.

Les données sur les propriétés chimiques et le comportement dans l'environnement de l'atrazine sont issues d'informations rassemblées par le département de phytopharmacie de l'INRA (base de données AGRITOX : <http://www.inra.fr/agritox/listesa/listesa.html>). Ces données sont pour la plupart issues de mesures en laboratoire et seront utilisées pour caler le modèle.

- Constante de Henry : 2.6×10^{-4} Pa*m³/mole, l'atrazine peut être entraînée dans l'atmosphère au moment de son application.
- Koc : 100 g/cm³, relativement mobile
- Kd = 1 à 8, ce qui est faible et indique que l'atrazine est peu retenue dans le sol
- Temps de demi-vie : 86 j

➤ Caractéristiques des Phényl-urées

Le tableau suivant propose une synthèse des principales caractéristiques dans l'environnement.

	Diuron	Isoproturon	Linuron
Koc	480	80 à 230	400
Demi-vie	90 à 180 jours	12 à 45 jours	60 jours
Stabilité dans l'eau	Rapidement dégradé par photolyse dans les eaux de surface	Stable à tous pH	/
Constante de Henry	$5,1 \times 10^{-5}$	$9,7 \times 10^{-7}$	$6,6 \times 10^{-3}$

Les possibilités de transferts pourront être modélisé en intégrant ces informations : le diuron est quantitativement plus adsorbé sur le sol que l'isoproturon, le linuron est la seule molécule susceptible de se volatiliser.

2. Contexte de l'étude : le bassin versant du Ruiné

2.1 *Situation géographique et climat*

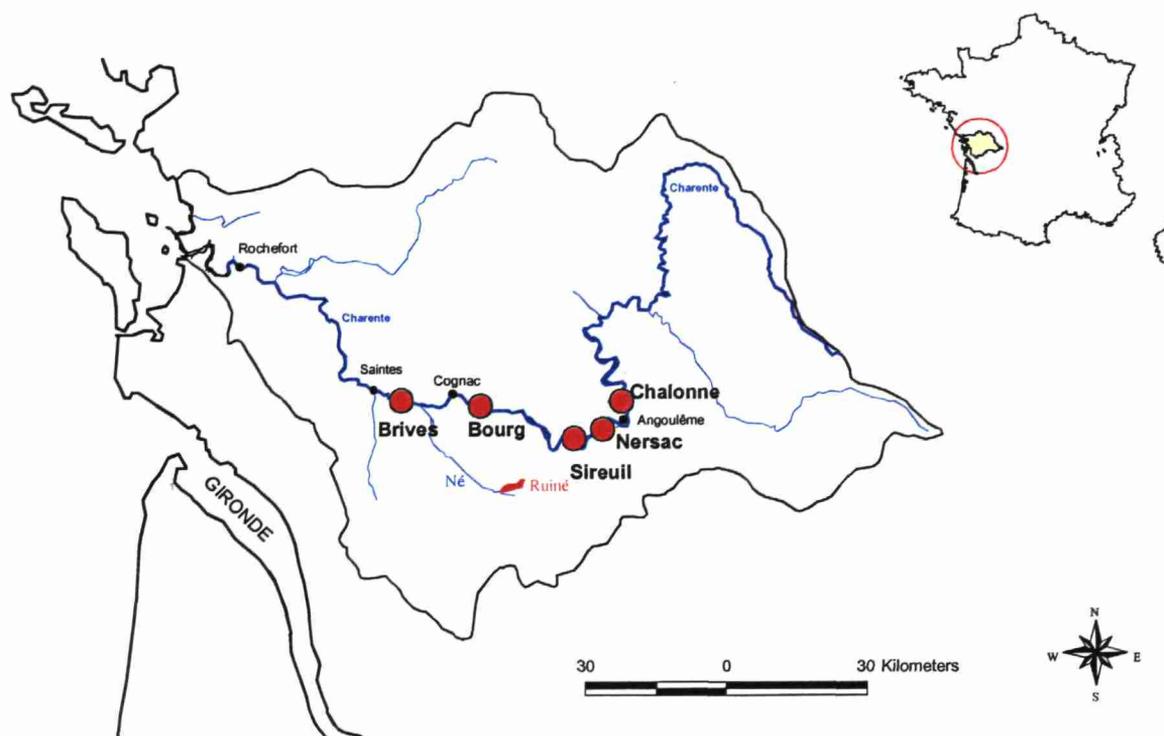


Figure 6 : Localisation du domaine d'étude.

Le Ruiné draine un petit bassin versant d'environ 5,5 km². Il est situé dans le bassin de la Charente au Nord de Barbezieux, sur la commune d'Aubeville. Bassin essentiellement agricole (surface agricole utile de 4,7 km²), il regroupe 26 exploitants agricoles. La vigne et le maïs couvrent 50% de la surface agricole.

Le sol de ce bassin présente une réserve utile fixée à 100 mm, conformément aux travaux de L.SOGGIU (cartographie des unités morphologiques du bassin versant de la Charente) qui préconise pour ce secteur une RFU (réserve facilement utilisable) de 60 à 100 mm. La réserve facilement utilisable est un terme d'agronomie qui désigne la capacité de stockage-déstockage en eau des sols, il s'agit de l'eau mobilisable par les cultures.

Le climat qui règne sur le bassin du Ruiné est un climat océanique.

La station Météo France la plus proche du site, fournissant les valeurs journalières d'ETP est celle de Château Bernard (Cognac).

2.2 Dispositif expérimental et acquisition des données

a) Données de pluie et débit

Une station permanente est installée à l'exutoire du bassin depuis 1991. Elle est équipée d'un système de mesure en continu des débits relié à une centrale d'acquisition des données. Deux préleveurs automatiques asservis au débit échantillonnent en période de crue. En période ' normale', un échantillon instantané est prélevé toutes les semaines.

En complément de ce dispositif, deux pluviomètres sont installés sur le bassin et enregistrent en continu les données de pluie. Deux centrales d'acquisition de données enregistrent les hauteurs de pluie tombées par jour pour les années 1991 et 1992 ; par minute avec une précision à 0.2 mm et 0.5 mm pour les années suivantes (1993 à aujourd'hui).

Les données récoltées par la centrale d'acquisition sont traitées systématiquement et enregistrées dans des fichiers Excel. Les données brutes contiennent de l'information parfois erronée suite à des problèmes matériels (décrochement de sonde pour le débit, pluviomètre bouché ...), des enregistrements 'inutiles' (débit inchangé sur plusieurs pas, sommation de pluies 'insignifiantes'). Il faut donc nettoyer ces fichiers pour rendre l'information facile à consulter, cette étape est réalisée au détriment de la précision (remplacement de données manquantes par une donnée interpolée, suppression de données répétées). Ceci est surtout vrai pour les données débit. En ce qui concerne les précipitations, l'installation de deux pluviomètres permet de pallier une défection technique.

D'autre part, pour les données de débit la centrale enregistre des hauteurs d'eau. Ces dernières sont transformées en débit par le biais de formules empiriques variant selon l'envasement du ruisseau.

b) Evapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration potentielle (ETP) ou quantité maximale d'eau susceptible d'être émise dans l'atmosphère par évaporation et transpiration, ne peut être mesurée de façon simple ; elle est calculée à partir de la température de l'air à la période considérée. Les données quotidiennes d'ETP (calculées par la formule de PENMAN, Cf. annexe 2 et 5) ont été achetées à la station Météo France de Châteaubernard.

c) Paramètres de qualité de l'eau

Un préleveur automatique déclenché par le débit du cours d'eau est couplé à la station permanente à l'exutoire du bassin versant. Ainsi, des échantillons d'eau sont réalisés, en période de crues toutes les heures, hors ces périodes à pas de temps hebdomadaire. Ce qui permet d'étudier les paramètres de qualité de l'eau : pH, température, conductivité, MES, nitrates, phosphore, pesticides.

Les produits recherchés sont des triazines (atrazine, simazine, terbutylazine) et certains de leurs métabolites (déséthyl-atrazine et désisopropyl-atrazine) , des phényl-urées (diuron, isoproturon, linuron). Ils sont dosés par chromatographie.

d) Pratiques culturales

Depuis 1991, le bassin du Ruiné fait l'objet d'un suivi des pratiques agricoles à l'échelle de la parcelle culturale. Les enquêtes menées auprès des 23 exploitants du bassin consistent en un inventaire des pratiques culturales sur chaque parcelle : semis, récolte, labour, traitement appliqués en herbicides, insecticides et fongicides incluant les produits utilisés, les doses appliquées à l'hectare et la date de traitement (la semaine étant retenue comme unité de temps, la date est notée lorsqu'elle est connue précisément). Chaque parcelle est renseignée. L'enquête intègre également les variations de surface que peuvent subir les parcelles (fusion, découpage éventuel).

3. Constitution des bases de données

Les données collectées depuis 1991 ont été rassemblées dans une base de données réalisée grâce à SAS dont les programmes sont présentés dans les annexes 3, 4, 6 et 7).

Deux bases de données ont été constituées : la première rassemble les données hydrologiques : ETP, pluie et débit ; la seconde, les données concernant les pratiques culturales : date des apports de pesticides et résultats de dosage de pesticides et ses résidus dans le cours d'eau.

3.1 *La base de données 'hydro'*

Cette base de données a été construite à partir de fichiers Excel et de données brutes de la centrale (fichiers au format ASCII.dat).

Il s'est agit, dans un premier temps, de définir le pas de temps de travail. Pour que la modélisation puisse reproduire les phénomènes naturels, le pas de temps doit être inférieur au temps de réaction du bassin versant. Aussi, des études précédentes ont démontré que dans le cas de précipitations ayant un effet sensible sur le débit du ruisseau, il fallait de l'ordre de 6 heures pour déclencher une crue ; c'est à dire qu'il faut en moyenne 6 heures entre le début de l'averse et la réaction du cours d'eau. Les données que nous possédons depuis 1993 sont assez précises pour réaliser une base de données au pas de temps de l'heure. Nous avons pris le parti d'abandonner les données de 1991 et 1992 car les données de pluie ne sont pas suffisamment précises puisque quotidiennes et d'autre part les données de débit présentent beaucoup de données manquantes.

Les données de débit enregistrées en continu sont donc moyennées et celles de pluie sommées afin d'obtenir une valeur par heure.

Pour ce qui est des données d'ETP, les valeurs journalières ont été fournies par la station de Château-Bernard et répartie sur les heures de jour et où il ne pleut pas. En effet, il n'aurait pas été correct de répartir ces valeurs uniformément sur les 24 heures de la journée sachant qu'il y a peu d'évapotranspiration la nuit et pas lorsqu'il pleut. Un programme réalisé sous SAS présenté en annexe 5 a permis cette répartition horaire.

Les valeurs horaires des données de débit, pluie et ETP ainsi obtenues. Nous avons ensuite complété cette base avec les enregistrements bruts quand cela était possible afin de minimiser le nombre de données manquantes.

3.2 *La base de données 'phyto'*

Cette base de données a été construite à partir de fichiers Excel dont les informations proviennent des enquêtes réalisées auprès des exploitants agricoles du bassin versant.

Dans un premier temps, nous nous consacrerons à un herbicide : l'atrazine et ses métabolites le DEA (déséthylatrazine). Les dates d'épandages sont connues à la semaine ; on a choisi arbitrairement d'affecter 1/7 de l'apport hebdomadaire à chaque jour de la semaine, à midi.

Les concentrations d'atrazine et DEA sont mesurées une fois par semaine en période 'normale'. En période de crue le préleveur automatique échantillonne l'eau du Ruiné, ce qui permet d'avoir une meilleure estimation du flux de pesticides dans ces périodes à risque.

Les valeurs horaires sont obtenues par interpolation des valeurs connues. Cette étape est réalisée sous SAS et avec la procédure 'expand'.

4. Analyse descriptive des données

4.1 *Analyse univariée des données d'hydrologie*

L'étude porte sur plus de 8 ans de données, du 1^{er} mars 1993 au 3 décembre 2001 soit 76800 heures.

a) Variable débit

La variable débit présente quelques données manquantes (5214 sur 76 800), réparties de façon hétérogène : près de la moitié des données manquantes (48.81%) sont affectées à l'année 1995 et 1% aux années 1997 et 1999 réunies. Leur origine est multiple. L'acquisition des données de débit se fait par une centrale unique ce qui génère une dépendance au matériel. Ainsi l'absence de blocs de données : exemple du 7 juillet au 15 juillet 93 soit 196 heures manquantes, janvier et février 95 (263 heures), novembre 95 (365 heures), février 96 (143 heures), juin 96 (171 heures) ...

D'autre part, certains enregistrements n'ont pas été conservés dans les fichiers Excel, lorsque le débit restait inchangé sur plusieurs pas de temps, seule une valeur moyenne était conservée afin d'alléger les fichiers. Les valeurs manquantes sont remplacées par la dernière valeur retrouvée.

Le débit du cours d'eau peut prendre des valeurs très diverses selon la saison. Des périodes d'étiage peuvent être observées en été (août 93,97,98 et 2001 ; juillet et août 96 ; septembre 99 et 2000) alors que des débits dépassant 500 litres par seconde peuvent être atteints en février 95 et 96, décembre 99 et novembre 2000. Les mois de février et avril 94 ont atteint des records avec des valeurs de débit supérieures à 600 L/s.

Il est intéressant pour la variable débit de tracer la série chronologique.

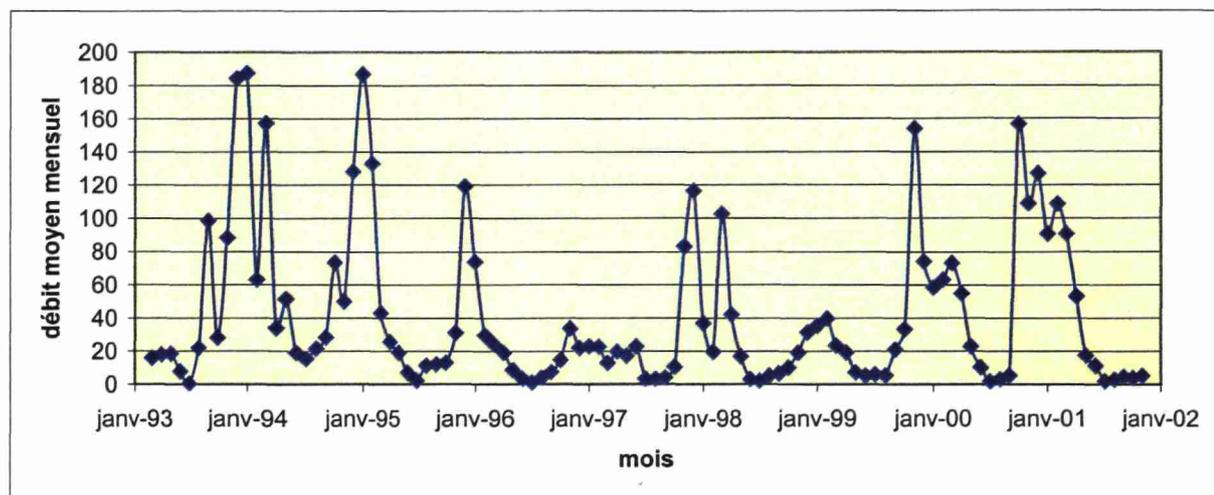


Figure 7 : Evolution au cours du temps du débit mensuel.

Cette représentation graphique met clairement en évidence une tendance annuelle du débit du cours d'eau, des valeurs particulièrement faible pour les hivers 96-97 et 98-99 ; une forte variabilité en 1994.

Ce qui est confirmé par le graphe ci dessous :

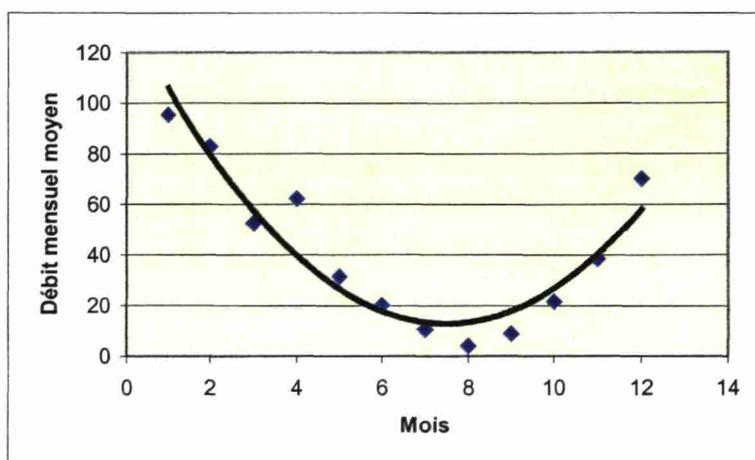


Figure 8 : Régression polynomiale du débit mensuel moyen.

La tendance de la courbe s'ajuste bien sur les valeurs moyennes ($R^2 = 0.90$). Cependant il faut être prudent car chaque moyenne mensuelle est obtenue à partir de peu de points. En effet dans un premier, les 12 valeurs mensuelles sont calculées pour chaque année en sommant les données de pluviométrie ($n = 648$ à 744 selon les mois) puis moyennées par mois ($n = 8$ ou 9 selon les années).

Cette courbe permet tout de même d'observer un débit moyen maximal en hiver et minimal en été. Ceci est très fortement au climat tempéré de la zone d'étude, en effet le cours d'eau alimenté par les précipitations voit son débit minimal en été et maximal en hiver.

b) Variable pluie

Grâce à l'installation de collecte de données (2 pluviomètres), on considèrera que la variable pluie ne présente aucune donnée manquante bien que certains enregistrements aient été sommés et affectés à minuit.

Sur les 76 800 heures d'étude, 8254 heures présentent des enregistrements de pluviométrie différents de zéro soit 10.75 % des heures étudiées. La hauteur de pluie par heure peut aller de 0.2 mm dans 35.87 % des heures de pluie à 26 mm (orage du 24 juin 1994, 45 mm en 3 heures). Cependant les hauteurs de pluie dépassant 3 mm par heure sont rares (6.20 %).

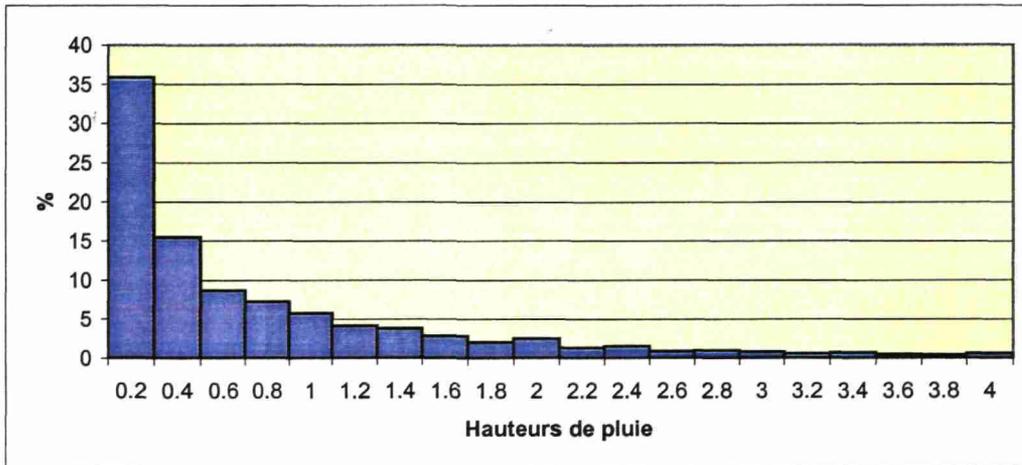


Figure 9 : Caractéristiques de la distribution des hauteurs de pluie.

Bien que la majorité des hauteurs de pluie soient de 0.2 mm par heure, il est difficile de qualifier une telle averse comme telle. D'autant plus que l'heure affectée aux pluies est celle du basculement de l'auget, or son remplissage a pu s'effectuer en plus d'une heure. En effet, cette hauteur de pluie peut être due à une condensation d'humidité, rosée matinale auquel cas l'humidité de l'air se condense pendant un long moment jusqu'à provoquer un basculement d'auget. Toutefois, cette faible hauteur de pluie est retrouvée de façon équiprobable quelle que soit l'heure la journée.

Selon les années les hauteurs annuelles de pluie peuvent assez proches.

Année	Hauteurs de pluie
1994	1229.5 mm
1995	960.3 mm
1996	845.8 mm
1997	842.2 mm
1998	862.4 mm
1999	976.7 mm
2000	962.0 mm

Tableau 1: Hauteurs de pluie annuelles.

Remarque : les années 1993 débutant en mars et 2001 finissant début décembre ne sont pas considérées dans ce tableau.

La moyenne inter annuelle étant de 954 mm, 1994 se remarque comme étant particulièrement humide ce qui permet probablement d'expliquer les forts débits durant cette même année.

Cependant la répartition annuelle des pluies peut être très variables. Considérons les statistiques présentées dans le tableau ci dessous.

	Moyenne	Ecart type	max.	min.
janvier	95.3	60.1	175.9	13.4
février	74.5	35.7	117.8	13.2
mars	53.1	51.3	164.2	1.8
avril	95.8	56.9	180.6	14.2
mai	70.4	37.0	136	9
juin	65.8	45.5	130.6	7.6
juillet	54.8	23.9	105.8	25.6
août	47.0	27.3	85	16.6
Sept.	91.6	62.6	176	20.4
oct.	89.9	31.7	150.8	35.6
nov.	98.7	64.4	242	36.8
déc.	107.5	50.4	189.2	51.6

Tableau 2: Statistiques des hauteurs de pluies mensuelles.

L'année 1994 explique une grande partie de la variabilité dans les résultats : en effet, les valeurs maximales de janvier, février et avril, ainsi que la valeur minimale de mars sont de l'année citée.

c) Variable ETP (évapotranspiration potentielle)

Les plantes consomment des quantités d'eau supérieures à celles qu'elles fixent dans leurs tissus ; elles sont en permanence traversées par des flux d'eau dont la majeure partie est redistribuée dans l'atmosphère. Cette notion de consommation potentielle en eau a été introduite par Penman en 1948, exprimée, comme les précipitations, en hauteur d'eau (mm) elle représente l'ensemble de l'eau perdue par la plante (transpiration) et le sol (évaporation).

La variable ETP quotidienne suit une distribution sinusoïdale. Ceci est très fortement lié à son expression puisqu'elle est calculée à partir de la durée d'ensoleillement, de la température, de l'humidité de l'air. (Cf. annexe 2)

Pour les mêmes raisons, on peut remarquer la tendance générale de l'ETP mensuel qui s'ajuste de façon très satisfaisante ($R^2=0.86$) par un polynôme de degré 2, l'ETP est maximal en été, tout comme l'ensoleillement.

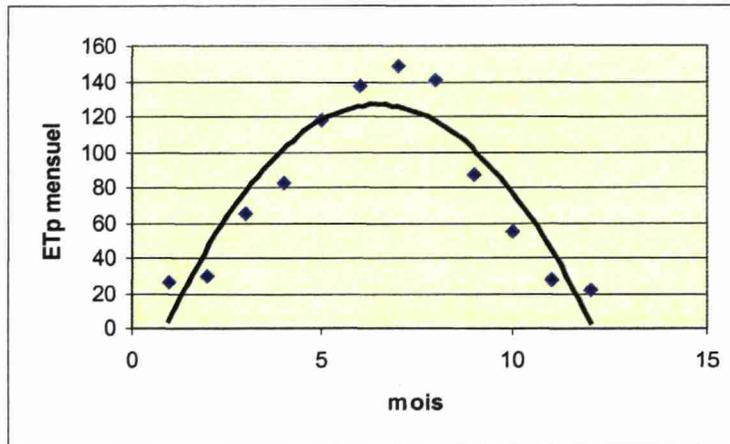


Figure 10 : Tendance de l'ETP mensuelle moyenne.

4.2 Analyse bivariée des données d'hydrologie

Le débit du cours d'eau et la hauteur de pluie sont naturellement en relation, cependant cette relation n'est pas simple et de nombreux facteurs interviennent : intensité de pluie, humidité du sol ... Le graphe ci dessous donne un exemple de cette relation complexe

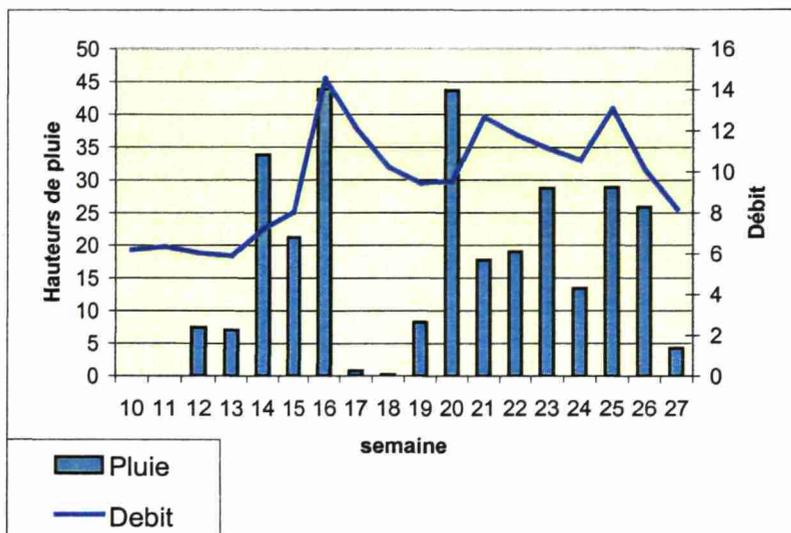


Figure 11 : Illustration de la relation pluie / débit .

Un ou plusieurs épisodes plusieurs peuvent déclencher une crue du ruisseau. A une même hauteur de pluie ne correspond pas la même réponse du cours d'eau. La relation pluie débit est un phénomène très complexe.

d'une accumulation de pluies et après écoulement des précipitations sur les versants du bassin.

Aussi, les résultats ci dessous sont cohérents avec ces connaissances.

➤ A l'heure

	Débit	Pluie	ETP
Débit	1	0.07	-0.18
Pluie		1	-0.14
ETP			1

➤ Au mois

	Débit	Pluie	ETP
Débit	1	0.55	-0.49
Pluie		1	-0.35
ETP			1

Tableau 3 : Corrélations des variables d'hydrologie.

Les corrélations à l'heure sont nulles. L'eau qui tombe sur le bassin versant est collectée avant d'arriver dans le cours d'eau ; la réaction du ruisseau n'est pas instantanée. Les corrélations des données décalées dans le temps : débit à l'instant t avec pluie à l'instant t-1 ; débit à l'instant t et pluie à l'instant t-2 ... donnent une relation la plus forte avec un décalage de 6 heures. Cependant la relation n'est pas très forte puisque le coefficient atteint à peine 0,17. Ce résultat n'est pas surprenant ; nous savons en effet, qu'une crue est déclenchée par une accumulation de pluie.

Aussi, la corrélation est beaucoup plus significative à l'échelle du mois. Le cumul des pluies mensuelles est corrélé (55%) au débit moyen mensuel.

Ces deux résultats justifient le choix d'un modèle à réservoir, ce qui permet de reproduire le stockage d'eau de pluie dans le sol avant qu'il ne rejoigne le cours d'eau.

4.3 Analyse des données phyto

Cette base de données regroupe les résultats d'apports d'Atrazine (en kg) et des dosages d'Atrazine, DEA et DIA exprimés en ng/l (1 ng = 10⁻⁹ g) des années 1993 à 1997.

Les apports d'Atrazine varient d'une année à l'autre selon la surface de maïs exploitée sur le bassin versant. Sur les 5 ans d'étude, 127 kg d'Atrazine sont épandus en moyenne par an sur l'ensemble du bassin versant.

Apport d'Atrazine en kg	
1993	100.3
1994	95.9
1995	142.9
1996	142.3
1997	154.7

Tableau 4: Quantités d'Atrazine apportées par an (en kg).

Les concentrations de ces produits dans l'eau du ruisseau sont très variables, selon la saison. En effet, des concentrations élevées sont observées dans les quelques semaines qui suivent l'épandage.

	Concentration moyenne (ng/l)	Ecart type	Concentration maximale (ng/l)
Atrazine	578.8	5084.1	113 935.4
DEA	1 166.2	13 926.9	368 853.27
DIA	829.0	1 552.1	12 850.3

Tableau 5 : Statistiques des concentrations d'Atrazine, DEA et DIA.

Les concentrations en produits sont en général les plus faibles en hiver, régulièrement nulles. Cette période correspond à des débits d'eau assez élevés ce qui engendre une dilution des polluants. D'autre part, les pesticides sont épandus au printemps (entre mars et mai), et en hiver moins de produits sont donc mobilisables par les flux d'eau.

Pour ce qui est de l'Atrazine, les concentrations les plus élevées correspondent à des prélèvements réalisés en mai, pour ses métabolites DEA et DIA, en juillet et août.

Cependant, les valeurs exprimées en concentrations ne reflètent pas la quantité de produits déplacée. Lors d'une averse des pesticides sont emportés dans l'eau de ruissellement mais l'effet de dilution peut masquer un flux de produits.

Aussi, il est intéressant d'observer les quantités d'Atrazine ($A = C \times D$) et ses métabolites ; avec C : concentrations des produits en ng/l d'eau, D : le débit du cours d'eau en l/s et A : la quantité de produit en ng/s.

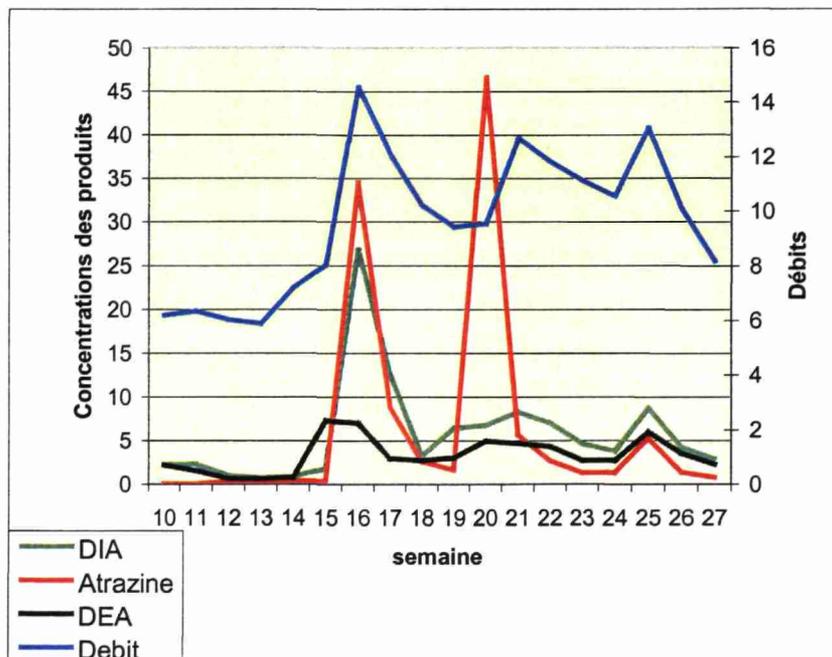


Figure 12 : Exemple de mobilisation d'Atrazine, DEA et DIA lors d'une crue.

Une crue est générée suite au ruissellement des eaux de pluie le long des versants du bassin. Ce phénomène est propice à l'entraînement de produits phytosanitaires dans le cours d'eau. Aussi, le graphe illustre bien ce problème : on peut observer qu'une quantité importante de pesticides est déplacée en même temps que l'eau qui fait grossir le débit.

5. Modélisations

Il existe aujourd'hui un certain nombre de modèles relatifs au devenir des produits phytosanitaires dans l'environnement mais l'inconvénient est qu'ils sont spécifiques des sites et produits étudiés. (Cf. références bibliographiques)

Notre approche s'est organisée en deux étapes : modélisation des flux d'eau puis des flux de pesticides. Cette démarche repose sur l'observation suivante : les flux de pesticides les plus importants sont, en général, observés lors des épisodes de pluie engendrés par de fortes précipitations.

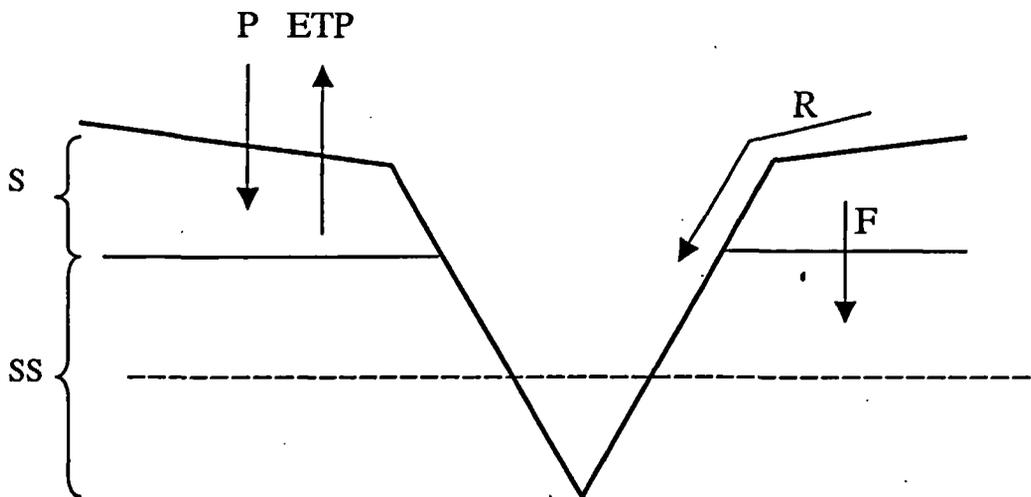
5.1 *Modèle pluie-débit*

Une des difficultés est de caractériser la forte variabilité temporelle des débits en fonction de la principale donnée : la pluie. Car la relation pluie / débit n'est pas évidente. Le réseau hydrologique garde en mémoire l'histoire hydrologique du site : les débits d'eau ne dépendent pas seulement des pluies précédant de quelques heures, mais aussi des événements antérieurs plus anciens (quelques jours ou quelques semaines).

Pour modéliser les débits d'eau provenant plus ou moins directement de la pluie, nous avons mis au point un modèle global conceptuel. Ce type de modèle a l'avantage de donner une représentation physique simplifiée du bassin versant. Il n'a pas pour objectif de cerner très précisément la réalité des processus élémentaires mis en jeu dans les transferts d'eau cependant il doit s'en approcher afin de pouvoir étudier les transferts de pesticides.

a) Structure du modèle

Le modèle prend en compte l'eau des précipitations, la partie qui ruisselle à la surface du sol, l'eau de surface qui s'évapore, l'eau qui a traversé la partie superficielle du terrain. Après avoir tenté différentes structures de modèle, la plus simple et qui reproduit au mieux les débits du cours d'eau est la suivante :



avec P : les précipitations
 S : le sol
 SS : le sous-sol
 R : le ruissellement
 F : l'infiltration
 ----- le niveau d'eau dans le réservoir sous-sol

Figure 13 :Schématisation du bassin versant.

Remarque : le débit des base du Ruiné est considéré comme proportionnel au niveau de remplissage du réservoir sous-sol.

La conception de la formation des débits repose sur un partage de la pluie au niveau de la surface du sol. Une partie des eaux de pluie rejoint le cours d'eau par ruissellement (R), une autre partie après infiltration (F) du sol vers sous-sol.

Il s'agit d'un modèle à 2 réservoirs :

- le premier 'réservoir' noté S (sol). D'un point de vue physique, ce réservoir correspond à la partie supérieure du sol, couche aérée, qui stocke les précipitations. L'eau est aussi déstockée de S par évapotranspiration, et attirée vers le bas sous l'effet de la pesanteur constitue le terme d'infiltration. Le terme de ruissellement comprend le débordement du réservoir S et l'eau qui n'a pas pu entrer dans ledit réservoir .
- la partie inférieure notée SS (sous-sol) se remplit par le phénomène d'infiltration et correspond d'un point de vue physique à la nappe phréatique. Le débit du cours d'eau est en relation direct avec le niveau d'eau dans le sous-sol. Une partie de l'eau s'infiltre plus en profondeur, fuite de la nappe phréatique : vidange de SS. Cette fraction perdue pour le système sera tout de même considérée dans la modélisation.

Le terme d'infiltration (F) correspond à la perméabilité ou infiltrabilité du sol. Il est variable selon son humidité. L'eau qui tombe à la surface du sol commence à humidifier la

partie supérieure du sol. Si l'humidification du sol continue, l'eau s'infiltré: ce phénomène est très lent. Ainsi, l'infiltrabilité du sol est fonction de son humidité et minimale en sol sec.

Le ruissellement superficiel survient lors d'un événement pluvieux à partir du moment où l'intensité des précipitations dépasse la capacité d'infiltration du sol. Les produits phytosanitaires présents à la surface du sol peuvent alors être transportés dans l'eau de ruissellement.

Le terme R prend en compte le ruissellement si bien que les entrées d'eau dans le ruisseau sont toujours plus régulières que les précipitations. Divers mécanismes entrent en jeu :

- le 'débordement' du réservoir S. D'un point de vue physique, le réservoir S correspond à la RFU (réserve facilement utilisable) du sol, il s'agit de la quantité maximale d'eau facilement disponible à la plante et qui est susceptible de retourner à l'atmosphère. Cette grandeur agronomique est estimée à partir de la composition du sol, la profondeur de la nappe ... Elle est estimée a priori entre 60 et 100 mm. Si le sol est gorgé d'eau, on peut alors observer un ruissellement : la pluie est supérieure à la vidange de S.
- le ruissellement par dépassement de l'infiltrabilité. Ceci intervient le plus souvent dans le cas où le sol est trop sec, l'infiltrabilité est alors très faible (phénomène de croûte de battance).

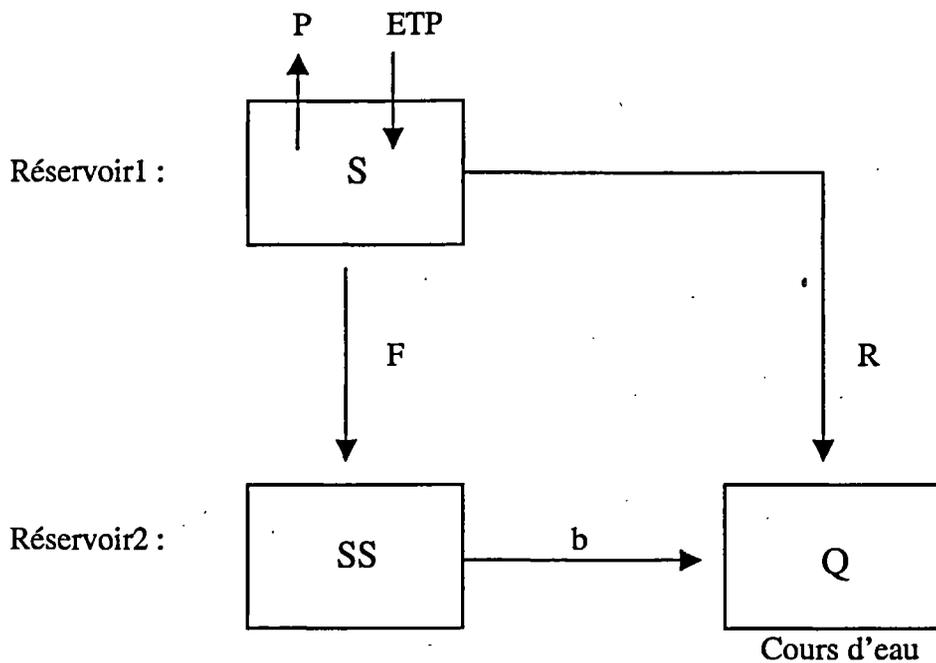
b) Programmation sous SAS

La version 8.2 du logiciel SAS a été utilisée tant pour construire les bases de données que pour la modélisation.

Dans un premier temps, les valeurs de débit absentes sont remplacées par la dernière valeur rencontrée. En effet, pour optimiser l'information disponible, on considère que le débit est resté constant durant les pas de temps où la mesure n'a pas été prise. Le risque d'introduire des erreurs grandit avec la taille du bloc de données manquantes.

Dans un second temps, le module SAS/ETS permet l'étude et la modélisation de séries chronologiques. La modélisation à proprement parler a été réalisée via la procédure Proc model qui permet de traiter des systèmes d'équations et les relations non linéaires.

D'un point de vue schématique, le modèle peut se représenter comme suit.



avec P : les précipitations

S : le sol

SS : le sous-sol

R : le ruissellement

F : l'infiltration

Q : le débit

b : coefficient de transformation de hauteur d'eau dans SS en débit

Figure 14 : Structure du modèle hydrologique .

Les hauteurs d'eau dans les réservoirs et la taille de S ne sont a priori pas connues à l'instant initial mais sont nécessaires au démarrage du modèle. Elles sont fixées grâce aux connaissances à priori et sur le critère du R^2 .

Le réservoir SS est considéré de taille illimitée.

Le réservoir S est de taille S_m , constante.

A chaque pas de temps, le niveau d'eau dans les réservoirs S et SS est recalculé ainsi que le débit du cours d'eau, le ruissellement et l'infiltration.

Le système d'équations géré par ce modèle est le suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} S_t = \max(\min(S_{t-1} + P_t - ETP_t, S_m), 0) \\ F_t = P_t \times (S_{t-1} / S_m)^{0.5} \\ SS_t = a \times SS_{t-1} + F_t \\ R_t = \max(0, S_{t-1} - S_m) + P_t \times (1 - S_{t-1} / S_m)^{0.5} \\ Q_t = b \times SS_{t-1} + PDL(t) \end{array} \right.$$

avec F : l'infiltration pendant le pas de temps.

P : la hauteur de pluie en mm pendant le pas de temps.

S_m : la taille du réservoir S .

S : le niveau d'eau dans le réservoir S en fin du pas de temps ($S \leq S_m$).

S_w : le niveau d'eau dans le réservoir S en fin du pas de temps (intermédiaire de calcul, en cas de débordement de S on peut avoir $S_w > S_m$).

R : le ruissellement pendant le pas de temps.

SS : le niveau d'eau dans le réservoir SS en fin du pas de temps.

a et b : les paramètres du modèle ajustés par proc model.

Équation 1 : Système d'équations gérant le comportement hydrologique du bassin versant.

Dans un premier temps, le niveau d'eau dans S est calculé à partir de l'eau déjà présente dans le sol, de l'apport par les précipitations et des pertes estimées par l'ETP. De ce niveau dépend l'infiltration potentielle. L'expression du terme d'infiltration F est tel qu'il soit nul quand le sol est sec c'est à dire pour $S = 0$. Puis augmente proportionnellement à la racine carrée du taux d'humidité du sol (S_t / S_m).

Le niveau du sous-sol peut alors être calculé à partir de la quantité d'eau déjà présente dans la nappe, de l'apport par infiltration et du terme de vidange proportionnel.

Enfin, le terme de ruissellement, constitué du débordement de S ($\max(0, S_w - S_m)$) qui intervient au-delà du niveau S_m ainsi que de la pluie non infiltrée : $P_t \times (1 - S_{t-1} / S_m)^{0.5}$. Ce dernier terme permet d'avoir un ruissellement maximal en sol sec ($S_t = 0$).

Le paramètre a permet de prendre en compte l'eau qui s'écoule hors de la nappe phréatique, sort du système. Le paramètre est calé par le logiciel SAS.

Le paramètre b peut être considéré comme un coefficient de changement d'unité. En effet, il s'agit de convertir la hauteur d'eau dans le sous-sol en débit. Il s'agit du second paramètre du système.

Le débit est fonction de la quantité d'eau qui ruisselle (R) ainsi que du niveau du réservoir sous-sol (SS). L'expression $\ln(R \times SS + 1)$ permet d'introduire l'interaction de ces 2 composantes sur la crue avec un effet du ruissellement d'autant plus marqué que SS est haut. L'eau de ruissellement s'écoule lentement sur les versants du bassin, a priori on sait que la totalité de l'eau d'une averse met 6 heures à gagner le ruisseau. Le débit est donc alimenté de ruissellement de plusieurs pas de temps antérieurs. Une macro préexistante dans SAS %pdl (polynomial distributed lags) (cf. annexes 10) a été utilisée pour gérer ce type de décalage dans le temps. Elle permet de distribuer l'effet du ruissellement dans le temps.

La fonction %pdl(rpdl, n, d, r=both) permet d'introduire les n valeurs de ruissellement antérieures dans un polynôme de degré d .

$$r = \text{both} \Rightarrow b_{.1} = 0 \text{ et } b_{n+1} = 0$$

$$PDL(t) = b_1 \times \ln(R_{t-3} \times SS_{t-3} + 1) + b_2 \times \ln(R_{t-4} \times SS_{t-4} + 1) + \dots + b_{10} \times \ln(R_{t-12} \times SS_{t-12} + 1)$$

D'autre part, cette fonction permet de limiter le nombre de paramètres à estimer puisqu'on suppose que tous les coefficients des décalages s'expriment comme des polynômes orthogonaux de degré d :

$$b_i = \sum_{j=0}^d \alpha_j (i)^j$$

Avec $r = \text{both}$ et $d = 2$, les α_j se réduisent à un seul paramètre.

Le nombre n de décalages à introduire dans le modèle a été choisi sur le critère du R^2 , ce dernier semble optimal en considérant les 12 heures précédentes avec 2 heures de latence.

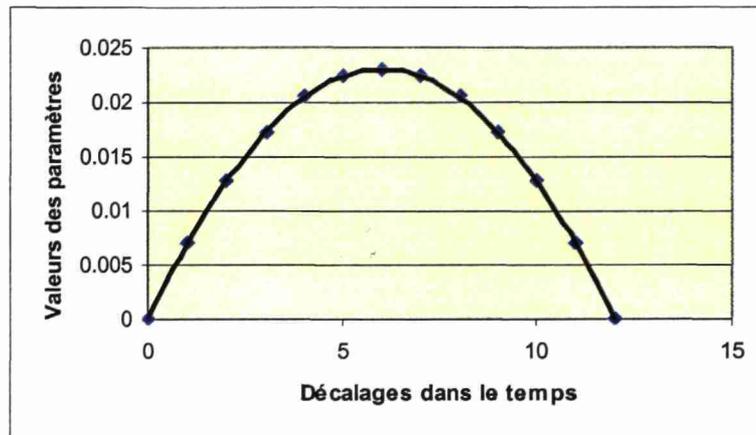


Figure 15 : Distribution des paramètres du ruissellement décalé dans le temps.

La modélisation a été réalisée sur la série du logarithme népérien du débit. En effet, la variabilité de la série 'brute' étant beaucoup plus élevée (3717.04 pour 1.59636). La série est beaucoup plus variable en périodes de forts débits qu'en périodes de faibles débits. La transformation par le logarithme permet d'obtenir des estimations de débits avec des intervalles de confiance moindres et assure de prédire des débits toujours positifs.

c) Hypothèses du modèle

Quelques hypothèses ont été posées afin de faciliter la modélisation :

- L'effet de la végétation est négligeable
- L'évapotranspiration a lieu les heures de jour et de non-pluie
- Les paramètres des valeurs de ruissellement décalées dans le temps suivent une distribution polynomiale de degré 2.
- Le ruissellement est une fraction de la pluie définie comme une fonction du taux d'humidité du sol.
- Homoscédasticité assurée par la transformation $\ln(\text{débit})$

5.2 Modélisation du flux de pesticides

La dissipation des produits phytosanitaires débute a priori, dès leur application. Trois processus fondamentaux vont contribuer à leur disparition de la surface du sol : la dispersion qui va entraîner le produit, la dégradation qui va assurer la transformation de la molécule mère et sa volatilisation.

Le transfert des produits est soumis à des variables de cinétiques propres qui sont fortement liées à la nature chimique du composé considéré.

La conception du transfert de produits phytosanitaires repose sur un modèle à 3 réservoirs.

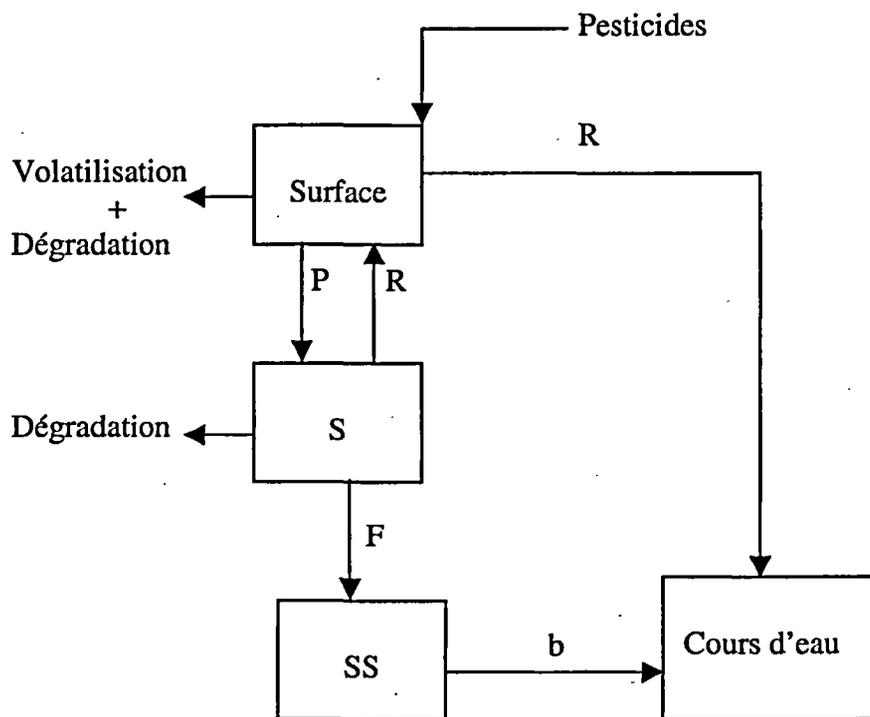


Figure 16 : Modèle conceptuel du transfert de pesticides

Les pesticides épanchés se retrouvent à la surface du sol où ils sont sujets à la volatilisation et au ruissellement par débordement du sol. Puis ils migrent vers le réservoir S, le sol, où les microorganismes pourront les dégrader. Ils sont ensuite entraînés vers le cours d'eau par ruissellement ou via le sous-sol, après infiltration.

6. Résultats et interprétation

6.1 Estimation des paramètres

The MODEL Procedure							
Nonlinear OLS Summary of Residual Errors							
Equation	DF Model	DF Error	SSE	MSE	Root MSE	R-Square	Adj R-Sq
logdeb	3	76785	26780.9	0.3488	0.5906	0.7816	0.7815
Nonlinear OLS Parameter Estimates							
Parameter	Estimate	Approx Std Err	t Value	Approx Pr > t	Label		
a	-0.00056	1.36E-6	-410.12	<.0001			
b	0.019428	0.000046	423.29	<.0001			
RPDL_2	-0.00064	8.47E-6	-75.60	<.0001	PDL(RPDL,10,2) parameter for (L)**2		

Bien que s'approchant, pour certains de grandeurs physiques mesurables, ces paramètres n'ont pas de signification physique bien déterminée, et n'apportent pas, par eux-mêmes, beaucoup d'informations pour le diagnostic. En revanche, l'utilisation de ces paramètres en simulation, à partir de données de précipitation et d'évapotranspiration potentielle permet de simuler le comportement du bassin de façon convenable puisque le modèle est capable de reproduire les débits avec un R^2 égal à 0,78.

$$SS_t = \exp(a) \times SS_{t-1} + F \Rightarrow SS_t = 0,99 SS_{t-1} + F$$

Il y a donc très peu de pertes vers la nappes.

Le paramètre b permet de convertir une quantité d'eau contenue dans le bassin pendant une heure en un débit d'eau en L/s.

6.2 Sensibilité du modèle

Certains résultats obtenus par le modèle sont très proches de ceux escomptés. A priori la RFU (réserve facilement utilisable) du sol qui correspond au réservoir a une taille de 60 à 100 mm, la valeur de 60 mm pour le réservoir S permet d'atteindre le R^2 le plus élevé.

Le modèle est très sensible à la taille de ce réservoir. En effet, la capacité de rétention d'eau du sol est la clé du modèle, elle influe sur l'infiltrabilité et donc le ruissellement, qui sont les bases de la formation des débits.

Le graphe présenté page 32 met en parallèle le débit observé et le débit prédit sur la période du 5 au 13 janvier 96. Il a été réalisé grâce à la procédure gplot de SAS dont le programme est donné en annexe 9.

Le débit simulé ne se cale pas parfaitement sur le débit observé, cependant le modèle réagit correctement d'un point de vue qualitatif : les décalages dans le temps sont corrects, le retour à un débit de base mime bien le comportement du Ruiné.

En revanche, on peut remarquer que d'un point de vue quantitatif le débit prédit oscille autour du débit observé sans que les courbes ne se superposent.

7. Discussion et perspectives

7.1 *Imprécisions des données*

Ce travail a été réalisé à partir de données recalculés ce qui semble être la principale source d'imprécisions et plus particulièrement en ce qui concerne la variable 'débit'.

Le premier point est la constitution de fichier Excel, il a déjà été soulevé et en partie corrigé par le biais d'extrapolation. Le second point réside dans l'obtention des valeurs de débit. En effet, la valeur enregistrée sur le terrain est une hauteur de sonde. Cette dernière est ensuite transformée en débit grâce à des courbes étalon : régulièrement des mesures de débit et de hauteur d'eau sont effectuées, la régression permet par la suite d'estimer le débit à partir de la hauteur de sonde. Dans les premières années de travail, des régressions linéaires ont été utilisées ; dans les plus récentes, il s'agit de régressions exponentielles. Aussi, la précision d'un fichier à l'autre est très différente. Les données brutes de hauteurs de sonde sont conservées. Cependant, pour recalculer les valeurs de débit il faut intégrer plusieurs facteurs dont l'état d'envasement du Ruiné et son encombrement qui peuvent augmenter artificiellement la hauteur d'eau. Il ne nous a donc pas semblé possible d'améliorer la qualité des données dans le temps imparti.

7.2 *Notions non exploitées*

Certaines connaissances ont été négligées dans cette étude notamment dans le but de mettre au point un outil simple de validation des techniques correctives. Cependant, elles sont susceptibles de limiter la performance dudit outil. Dans le cas où les résultats ne seraient pas satisfaisants, au cours de nombreuses réflexions nous avons soulevé des hypothèses du modèle qui pourraient être remises en cause.

C'est par exemple le cas du couvert végétal, il est négligé dans cette étude. Or dans les faits, l'état de la végétation agit tant sur l'écoulement de l'eau que sur le transfert des pesticides en entravant ces mécanismes. Les cultures telles que le maïs ont un cycle de développement court, les semis sont effectués à la fin du printemps et la récolte en automne. Aussi, il est possible en connaissant le cycle phénologique des cultures d'introduire l'effet de cette végétation.

Nous avons vu dans la bibliographie que l'intensité de pluie est un critère important pour le partage des eaux au niveau de la surface. Cette notion n'a pas été exploitée, nous sommes contents d'une hauteur de pluie par heure. Or il est possible d'affiner cette information en calculant la durée de pluie par heure. En effet, pour une hauteur de pluie donnée, l'effet sera différent selon que la pluie est tombée régulièrement tout au long de l'heure ou bien qu'elle que cette hauteur de pluie ait été collectée sur une très courte durée. Le principe d'enregistrement des données de pluie ne permet pas d'avoir une connaissance exacte de l'intensité de pluie. Car si on connaît l'heure de basculement des augets, on ne sait pas quand l'auget a commencé à se remplir.

La notion de flux préférentiels semble la plus difficile à introduire dans ce modèle. Nous avons agrégé dans la notion de ruissellement tous les mécanismes qui introduisent un retard entre la survenue d'une pluie et la réaction du cours d'eau. Or il existe des flux d'eau via des fissures du sol, rapides donc chargés en pesticides. Dans ces conditions, les processus

d'adsorption et de diffusion n'ont pas le temps d'intervenir, du moins de manière significative. Ainsi les produits phytosanitaires peuvent atteindre rapidement les nappes sans que le sol ait pu jouer son rôle de filtre.

7.3 *Données non exploitées*

Pour les mêmes raisons : par soucis de simplification et avec les mêmes risques nous n'avons pas exploité toutes les données à notre disposition.

En même temps que les données de qualité des eaux sont enregistrées, la conductivité est mesurée. Cette valeur de chimie permet de renseigner sur la provenance des eaux qui sont dans le cours d'eau. Plus la conductivité est élevée, plus l'eau contient des ions et donc a résidé dans le sol. Une eau qui ruisselle aura une conductivité faible par rapport à une eau qui s'est infiltrée.

Les données recueillies par enquêtes sont gérées par un système de gestion de base de données relationnelles couplées à un SIG (Système d'Information Géographique). Les apports d'engrais et de produits phytosanitaires sont figurés dans le temps et dans l'espace (localisation, pente, distance au ruisseau). Le bassin versant y est décrit au plan physique (géologie, pédologie, hydrologie ...), au plan de l'occupation du sol (au niveau de la parcelle culturale) et des pratiques. L'exploitation de ces données pourrait permettre de déterminer au sein de ce bassin versant des zones de risques de transferts de pesticides sur les critères de sollicitation des parcelles (quantités épandues), distance au ruisseau, classe de pente, type de sol ...

La distance au ruisseau lorsqu'elle augmente, présente deux avantages : elle permet une dispersion du produit et prolonge son transfert, augmentant ainsi ses chances d'être dégradé. Il en résulte que son impact sur la qualité de l'eau est moins important. Ces enquêtes regroupent aussi des données concernant le travail du sol. Une surface labourée est très favorable à l'infiltration.

Si un bon modèle global est mis au point, il est ensuite possible de le distribuer sur l'ensemble des parcelles (avec par exemple, n du %pdl variable selon la distance au cours d'eau). Cela représente un travail conséquent.

Toutes ces variables ne doivent pas être forcément introduire dans le modèle, il faut faire la part entre ce qu'elles apportent en qualité et en contraintes pour l'utilisateur du modèle.

CONCLUSION

L'étude suivie depuis plusieurs années sur le bassin versant du Ruiné a permis de faire un état du milieu et des pratiques dans un contexte d'observatoire. Le recueil de données presque exhaustives sur une longue période reste exceptionnel et constitue une base de données précieuse pour la suite du programme.

Le comportement complexe des substances phytosanitaires, incite à approfondir les connaissances sur tous les processus en cause de leur diffusion, transformation et transfert. En conséquence, l'étude effectuée durant ce stage apparaît comme le préalable nécessaire à la compréhension de la dynamique et le devenir de ces produits dans les eaux de surface.

En ce qui concerne notre modèle, il est possible de réaliser la validation sur les variables internes du modèle avec les données de 2002, de poursuivre les réflexions abordées sur le transfert des produits et de mettre au point un outil de validation de méthodes correctives.

Dans le cadre de la surveillance des milieux aquatiques, il serait intéressant d'intégrer la connaissance à venir dans les modèles mis au point. Par exemple, la libération de métabolites pouvant survenir bien plus tard lors de changements des conditions du milieu. Or les mécanismes responsables du piégeage et du relargage sont encore mal connus.

GLOSSAIRE

Adsorption-désorption : l'adsorption correspond à la fixation d'une molécule sur un composé insoluble, la désorption étant le phénomène inverse.

Bassin hydrographique ou bassin versant : zone géographique correspondant à l'aire de réception des précipitations et d'écoulement des eaux souterraines et de surface vers un cours d'eau; la frontière topographique est habituellement une ligne de faîte.

Capacité d'infiltration : vitesse maximale à laquelle un sol donné, dans des conditions données, peut absorber de l'eau par unité de surface.

Conductivité électrique de l'eau : capacité de l'eau à conduire le courant électrique, exprimée par l'intensité du courant par unité de surface divisée par la différence de potentiel par unité de longueur.

Évapotranspiration : mouvement de l'eau vers l'atmosphère par l'évaporation du sol et transpiration par les plantes.

Écoulement direct : écoulement qui atteint rapidement les cours d'eau. Il comprend l'écoulement de surface (ou ruissellement) et l'écoulement hypodermique (ou ruissellement retardé).

Herbicide : substance qui tue les végétaux, dont la formulation est souvent efficace contre certaines espèces; utilisé pour combattre les mauvaises herbes dans les terres cultivées, les jachères et les emprises.

Hydrologie : science ayant pour objet l'étude de la nature, de la formation et des propriétés mécaniques, physiques et chimiques des eaux marines et continentales.

Infiltration : pénétration des eaux superficielles dans le sol ou la roche par des fissures et des pores.

Pesticide : Produit chimique qui tue ou qui maîtrise les ravageurs; comprennent entre autres les herbicides, les insecticides, les fongicides.

Phytosanitaire : relatif aux soins à donner aux végétaux.

R.F.U. : Réserve Facilement Utilisable . il s'agit de la quantité maximale d'eau facilement disponible à la plante. Lorsque la réserve est inférieure à la RFU, la plante peine à s'alimenter en eau. Stockée dans les premiers décimètres du sous- sol , elle est à la disposition de l'évaporation atmosphérique et la transpiration végétale. Ce paramètre dépend étroitement de la nature du substratum et de sa capacité de rétention.

Ruissellement ou écoulement de surface : partie des précipitations qui s'écoule à la surface du sol.

Ruissellement retardé ou écoulement hypodermique : portion des précipitations infiltrées qui n'est pas descendue jusqu'à la nappe libre mais qui passe de la surface du sol vers les cours d'eau en cheminant au-dessous de la surface du sol.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] AMBROISE B., 1998. Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré : 1- Processus et facteurs, *Revue des sciences de l'eau*, 11(4), 1998 .470-495.
- [2] AMBROISE B., 1999. Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré : 2-Modélisation systémique et dynamique, *Revue des sciences de l'eau* 12/1 (1999).123-153.
- [3] DUBERNET JF. , 1997 : Dynamique de la simazine, de l'atrazine et de leurs métabolites dans le BVRE du Ruiné. Actes du 26ème congrès groupe français des pesticides. Processus de transfert des produits phytosanitaires et modélisation dans les bassins versants, Nancy, 22-23 mai 1996. pp. 191-198. Ed Cemagref.
- [4] DUBREUIL P., 1974 : Initiation à l'analyse hydrologique. Masson & Cie, éditeurs. 216 p.
- [5] DUPASQUIER B., 1999 : Modélisation hydrologique et hydraulique des infiltrations d'eaux parasites dans les réseaux séparatifs d'eaux usées. Thèse de doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts, Paris. 282 p.
- [6] EDIJATNO, MICHEL C., 1989. Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche*, 2, 113-121.
- [7] FRANCHINI M., PACCIANI M., 1991. Comparative analysis of several conceptual rainfall-runoff models. *Journal of hydrology*, vol.122, n°1-4, 161-219.
- [8] GREBIL G., NOVAK S., PERRIN-GANIER C., SCHIAVON M., 2001. Mécanismes de transfert et de dégradation des phytosanitaires. *Ingénieries*, numéro spécial 2001, 31-44.
- [9] GUTZLER L., 1998. Contribution à l'étude du transfert des phénylurées à l'échelle d'un bassin versant agricole. Le cas du bassin du Ruiné (Charente). Mémoire de DESS, Université Michel Montaigne, Bordeaux III. Ed. CEMAGREF .96 p.
- [10] HASEBE M., HINO M., HOSHI K, 1989. Prévision des crues par la méthode AR de séparation de filtre et comparaison de l'efficacité de modélisation par quelques modèles pluie-débit. *Journal of hydrology NLD*, vol. 110, n° 1-2, 107-136.
- [11] HAMMOUDA C., 1996. Contribution à l'étude des relations pluie/ débit sur un bassin versant agricole : Le Ruiné. Rapport de stage BTSA Gestion et maîtrise de l'eau. Ed. CEMAGREF. 46p.
- [12] JATON JF., 1982. Contribution à l'étude des relations pluie-débits dans les petits bassins versants ruraux. Thèse de doctorat, Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne. 171 p.
- [13] MICHEL C., 1989. Hydrologie appliquée aux petits bassins versants, Cemagref, Antony.
- [14] ROCHE M., 1971. Les divers types de modèles déterministes. *La Houille Blanche*, 2, 111-129.

[15] VERNIER F., LEVERT F., GUTZLER L., DUBERNET J.F., DELMAS F., PINEL B., 1999. Le bassin du Ruiné (Charente), synthèse des observations 1991-1997. CEMAGREF BORDEAUX ADBX, CEMAGREF BORDEAUX QEBX. 105 p.



Université de Bretagne Sud
Campus Tohannic
rue Yves Mainguy
56 000 Vannes

DIFFUSION INTERNE



Modélisation hydrologique d'un bassin versant en vue de l'étude des transferts de pesticides.

*Cas du bassin versant du Ruiné
(Charente)*

ANNEXES

LESCLAUX Séverine

Département Equipements pour l'Eau et l'Environnement
Unité Qualité des Eaux

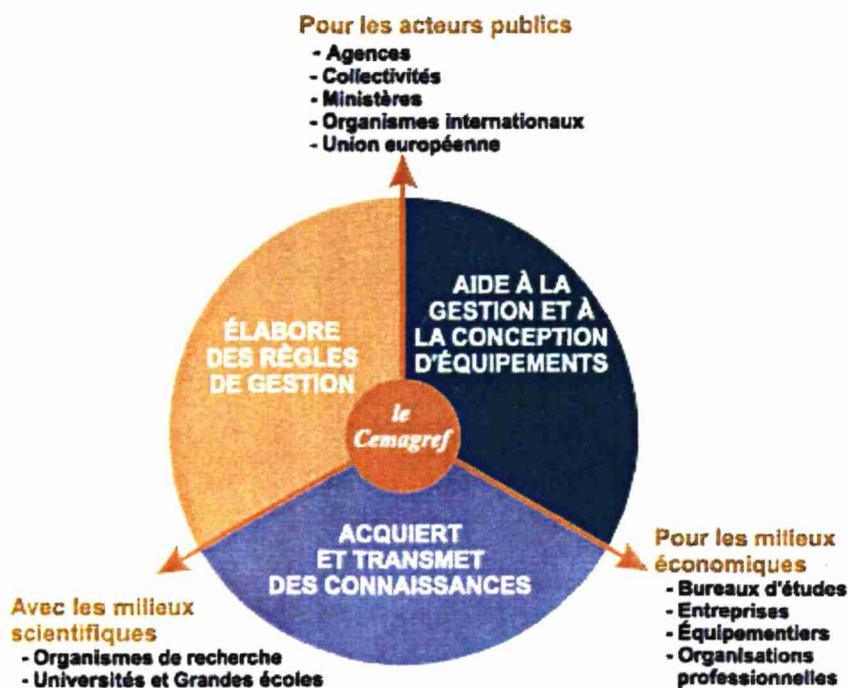
Groupement de Bordeaux
50, avenue de Verdun
Gazinet
33612 Cestas Cedex
Tél : 05 57 89 08 00 - Fax : 05 57 89 08 01

Septembre 2002

ANNEXE 1 : Présentation du CEMAGREF.....	2
ANNEXE 2 : Estimation de l'évapotranspiration potentielle.....	5
ANNEXE 3 : Macro permettant l'importation des données débit de Excel à SAS.....	6
ANNEXE 4 : Macro permettant l'importation des données pluie de Excel à SAS.....	9
ANNEXE 5 : Répartition de l'ETP par heure.....	12
ANNEXE 6 : Base de données 'hydro'.....	14
ANNEXE 7 : Base de données 'phyto'.....	15
ANNEXE 8 : Analyse descriptive des données 'hydro'.....	18
ANNEXE 9 : Modélisation du comportement hydrologique du bassin versant.....	21
ANNEXE 10 : Macro %pdl.....	23

ANNEXE 1 : Présentation du CEMAGREF

Le Cemagref est un institut de recherche à taille humaine avec ses 1 000 personnes dont 450 ingénieurs et chercheurs. Leurs compétences, centrées sur les sciences de l'ingénieur, intègrent les sciences de la nature et du vivant, les sciences de l'univers et mobilisent les sciences humaines et sociales. Le Cemagref accueille en moyenne une centaine de thésards et 500 stagiaires de longue durée.



Le Cemagref est un institut public de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement. Outre la contribution au progrès des connaissances, le Cemagref diffuse des méthodes de diagnostic et de contrôle, il développe des outils de négociation et de gestion, il conçoit des technologies innovantes et apporte son expertise aux services publics et aux entreprises.

Les recherches et les activités conduites au Cemagref donnent lieu à des produits variés. Ainsi, les publications, les participations à des colloques, les expertises et conseils aux services publics, les essais et analyses, les brevets et logiciels, la formation initiale et continue, la participation à la normalisation illustrent les missions de l'institut.

Ses quatre orientations scientifiques concernent :

- le fonctionnement des hydrosystèmes,
- le génie des équipements et services pour l'eau et les déchets,
- la gestion des territoires à dominante rurale,
- le génie des équipements dans le secteur agricole et alimentaire.

Les départements scientifiques

Le Cemagref compte 32 unités de recherche, 30 unités regroupées en 4 départements scientifiques, 2 unités rattachées à la Direction Scientifique. Ces unités de recherche sont réparties dans 10 implantations régionales.

Le centre de Bordeaux

Il est organisé en 4 unités de recherche et un laboratoire d'essais, couvrant l'ensemble des 4 départements scientifiques de l'établissement.

- Unités de Recherche :
 - ADER : Agriculture et dynamique de l'espace rural
 - ORH : Ouvrages et réseaux hydrauliques
 - QE : Qualité des eaux
 - RAC : Ressources aquatiques continentales
- Laboratoire d'Essais : Cemafroid : Groupement d'Intérêt Economique qui intervient dans la logistique des transports de produits alimentaires sous température dirigée.

L'unité Qualité des eaux

L'unité mène d'une part des recherches et des activités d'appui technique relatives aux altérations des milieux aquatiques continentaux, en liaison avec leurs différents usages, en vue de réduire les impacts subis et de restaurer leur qualité. Dans ce cadre, des travaux sont menés :

- pour étudier les flux de pollutions (nutriments, pesticides ...) à l'échelle de bassins versants, en relation avec les conditions pédo-climatiques, l'occupation du territoire et les pratiques humaines,
- pour identifier l'impact de pollutions diffuses et ponctuelles au travers du comportement de certaines communautés végétales (bio-indication),
- pour évaluer la capacité d'assimilation des hydrosystèmes liée au compartiment végétal (macrophytes, algues et bactéries)

L'objectif est de mettre à profit les connaissances accumulées grâce à ces actions de recherche pour appuyer la surveillance, la gestion opérationnelle, voire la restauration des écosystèmes aquatiques.

D'autre part, en appui aux politiques publiques et aux régimes d'aide à l'investissement, elle mène des travaux sur l'épuration de certaines eaux usées, portant notamment sur le dimensionnement des ouvrages et sur l'ingénierie des procédés. Les 2 domaines principaux d'application actuels concernent les filières d'épuration des effluents vinicoles et les systèmes d'épuration à biomasse fixée. Des développements d'activités sont envisagés sur le traitement de l'azote et sur l'intérêt des systèmes à membranes pour l'épuration des eaux usées urbaines.

A terme, il est envisagé de faire converger une partie des travaux de l'équipe "Hydrobiologie des écosystèmes" et de l'équipe "Epuración" au service de recherches visant à l'adaptation des filières de traitement et de la stratégie de rejets en fonction des caractéristiques et des potentialités du milieu récepteur.

Les approches développées au sein de l'unité conjuguent des mesures et expérimentations pratiquées sur le terrain, en systèmes aquatiques naturels d'eaux douces de surface (lacs, rivières et bassins versants) ou sur stations d'épuration, et des investigations de laboratoire pratiquées en canaux, microcosmes, pilotes...

Elles s'appuient sur les analyses physico-chimiques réalisées au sein du laboratoire d'analyse des eaux et des effluents de la Division.

Des synergies inter-unités de recherche sont développées avec plusieurs équipes du Groupement de Bordeaux et d'autres groupements du Cemagref, pour appréhender de façon plus complète et pluridisciplinaire le fonctionnement intégré des bassins versants soumis à des activités humaines polluantes (agriculture, rejets urbains et industriels ...).

Les équipements de l'unité

- Trois bassins versants expérimentaux instrumentés :
 - un bassin agricole de polyculture en Charente (Ruiné)
 - un bassin forestier de l'écosystème sableux Landais (Tagon)
 - un bassin mixte forêt-agriculture de l'écosystème sableux Landais (Arriou)
- Un laboratoire d'analyses des eaux et des effluents
- Matériels de mesure et d'analyse, d'échantillonnage et de saisie des données (terrain et laboratoires)
- Embarcations légères

ANNEXE 2 : Estimation de l'évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration potentielle (Etp) est théoriquement la quantité d'eau que cède une culture en pleine croissance couvrant totalement un sol largement pourvu d'eau par transpiration des plantes et évaporation du sol. Elle dépend donc du stade végétatif, de la plante, et des conditions climatiques.

L'Etp est aussi une mesure climatique, dont la valeur est établie à partir de relevés météorologiques selon des formules plus ou moins complexes impliquant des variables météorologiques mesurables. Il est à noter que l'Etp correspond à une valeur moyenne tous couverts végétaux confondus.

La formule de Penman est actuellement utilisée par Météo-France, qui fournit pour la plupart de ses stations des estimations d'Etp décennales et mensuelles. Cette formule possède une base physique. Elle prend en compte l'ensemble des mécanismes à un pas de temps généralement égal à la journée :

$$ETP = R_n \cdot \left[\frac{\delta}{\left(\frac{\delta}{\gamma} + 1\right)} \right] + E_a \cdot \left[\frac{1}{\left(\frac{\delta}{\gamma} + 1\right)} \right]$$

$$E_a = 0.26 [1 + 0.4 U] [P_{sa}(T_a) - P_a]$$

R_n = Rayonnement net ou bilan radiatif

g = Constante psychrométrique

d = pente de la courbe de tension de vapeur saturante en fonction de la température de l'air à la température T_a

U = vitesse moyenne journalière du vent à 10 mètres de hauteur

P_{sa}(T_a) = tension de vapeur saturante de l'air à la température T_a

P_a = pression atmosphérique


```

do;
  jour=input(scan(d,1," -"),ddmmyy10.);
  heure=input(scan(d,2," -"),time.);
  output;
  jour=input(scan(d,1," -"),ddmmyy10.);
  heure=input(scan(d,3," -"),time.);
  output;
end;

end; .
run;

/*Fermeture feuille Excel*/
data _null_;
file cmds;
put '[fermer]';
run;

/*Concaténation des données*/

data ruine.dxls (drop=d d3);
set ruine.dxls rd&i;
if hxls=. and debit=. then delete;
run;

%end;
%mend ruine_d;
%ruine_d;

/*Traitement des données manquantes signalées par -9999 dans Excel, des débits
négatifs et décrochements de sonde*/
data ruine.dxls;
set ruine.dxls;
if debit=-9999 then debit=.;
/*Le débit est mesuré de façon indirect via une hauteur de sonde, grâce à une
courbe d'étalonnage. Des valeurs négatives correspondent en été, à des valeurs
de débit nulles. En hiver, il s'agit de décrochement de sonde, et donc de
données manquantes */
if debit<0 and debit ne . and debit ne -9999 and hxls>=0 then debit=0;
mois=month(jour);
if hxls<0 and debit<0 and debit ne . and debit ne -9999 then do;
  if mois>=7 and mois<=9 then debit=0;
  else debit=.;
end;
drop mois;
run;

/*Débit horaire*/
data debit;
set ruine.dxls;
where debit ne . and jour between "01MAR93"d and "03DEC01"d;
heure=hour(heure);
keep jour heure debit;
run;

```

```
proc means data=debit nway noprint;
class jour heure;
output out=ruine.debith mean(debit)=debit;
format jour ddmmyy10.;
run;
```

```
data ruine.debith;
set ruine.debith;
drop _type_ _freq_;
run;
```

```
/*Données manquantes: 5214 sur 76800*/
proc sort data=ruine.debith;
by jour heure;
run;
```

```
data dateheur;
do jour="01MAR93"d to "03dec01"d;
  do heure=0 to 23;
    output;
  end;
end;
run;
```

```
data NAdebit;
merge dateheur ruine.debith;
by jour heure;
if debit=. then output;
run;
```

```
proc print data=NAdebit;
format jour ddmmyy10. ;
run;
```

ANNEXE 4 : Macro permettant l'importation des données pluie de Excel à SAS

```
libname ruine "M:\SAS\table SAS\";
filename cmds dde 'excel\system';

%macro ruine_p2;
data ruine.pluie2;
run;

/*Ouverture feuille Excel*/
%do i=15 %to 120;
data _null_;
fic="M:\donnees\pluie-débit\r&i..xls";
file cmds;
put '[erreur(0)]';
put '[ouvrir("' fic "')]' ;
run;

/*Lecture du pavé de données débit dans la feuille EXCEL*/
filename rp&i dde "Excel|[r&i..xls]P!L1C1:L5000C3";

data rp&i;
infile rp&i dlm='09'x dsd notab missover;
informat d $50.;
input d auget pluie;

if d ne '' then do;
    d2=scan(d,2," ");
    d3=scan(d,3," -");
    if d2='' then
/*cas des données journalières, il arrive parfois que la hauteur de pluie soit
quotidienne auquel cas , on affecte la valeur à minuit*/
        do;
            jour=input(scan(d,1," "),ddmmyy10.);
            heure=0;
            output;
            end;
    else do;
        if d3='' then
            do;
                jour=input(scan(d,1," "),ddmmyy10.);
                heure=input(scan(d,2," "),time5.);
                output;
                end;
            else do; /*cas des plages horaires*/
                jour=input(scan(d,1," "),ddmmyy10.);
                heure1=input(scan(d,2," -"),time5.);
                heure2=input(scan(d,3," -"),time5.);
                heure=(heure1+heure2)/2;
                output;
                end;
        end;
    end;
end;
run;
```

```

/*Fermeture des feuilles Excel*/
data _null_;
file cmds;
put '[fermer]';
run;

/*Concaténation des données*/
data ruine.pluie2;
set ruine.pluie2 rp&i;
if jour=. then delete;
if pluie=. then pluie=auget*0.2; /*1 auget = 0.2 ml*/
format jour ddmmyy10. heure time5.;
run;

%end;
%mend ruine_p2;
%ruine_p2;

data ruine.pluie2 (keep=jour pluie heure);
drop= d auget d2 heure1 heure2 ;
set ruine.pluie2;
if pluie=. then pluie=0;
format jour ddmmyy10. heure time5.;
run;

/*Recherche des données manquantes par fusion de 2 tables*/
/*Génération d'une liste de dates*/
data datep2;
do jour="01MAR93"d to "03dec01"d;
output;
end;
run;

data pluie2;
set ruine.pluie2;
run;
proc sort data=pluie2;
by jour;
run;

data NApluie;
merge datep2 pluie2;
by jour;
if pluie=. then output;
run;

proc print data=NApluie;
format jour ddmmyy10. heure time5.;
run;
/*0 jour manquant*/

/*Pluie par heure*/
data pluie2;
set ruine.pluie2;
if pluie=0 then delete;
heure2=hour(heure);
run;

```

```
proc means data=pluie2 nway noprint;  
class jour heure2;  
output out=ruine.pluie2h sum(pluie)=pluie_h;  
format jour ddmmyy10.;  
run;
```

```
data ruine.pluie2h;  
set ruine.pluie2h;  
drop _type_ _freq_ pluie heure;  
run;
```

```
data ruine.pluie2h;  
rename heure2=heure pluie_h=pluie;  
set ruine.pluie2h;  
run;
```

ANNEXE 5 : Répartition de l'ETP par heure

```
/*Indicatrice de non-pluie : ETP a lieu quand il ne pleut pas*/
data dateheur;
do jour="01MAR93"d to "03dec01"d;
    do heure=0 to 23;
        output;
    end;
end;
run;

data ruine.pluie2h;
merge ruine.pluie2h dateheur;
by jour heure;
if pluie=. then pluie=0;
if pluie gt 0.4 then indsec=0;
/*0.4=limite mini permet d'avoir au moins une heure par jour pour imputer
l'ETP (indsec=0)*/
else indsec=1;
run;

/*Importation des données de Météo France ETP*/
PROC IMPORT OUT= RUINE.ETP
            DATAFILE= "M:\donnees\ETP\ETP.XLS"
            DBMS=EXCEL2000 REPLACE;
    GETNAMES=YES;
RUN;

data ruine.etp;
set ruine.etp;
jour=datepart(date);
run;

/*Calcul du nombre d'heures de jour (par opposition à 'nuit') par jour:
fonction sinus minimale au 21 décembre. On travaille sur la période 01/03/90
03/12/01, avant pas de données pluie correctes*/
data etp (keep=jour debutj finj);
do jour="01MAR93"d to "03DEC01"d;
    n=year(jour);
    a=input("21/12/"||compress(n),ddmmyy10.);           /*21dec(n-1)*/
    b=input("21/12/"||compress((n-1)),ddmmyy10.);       /*21decn*/
    c=input("31/12/"||compress(n),ddmmyy10.);           /*31decn*/
    if (jour ge a) and (jour le c) then
        dureej=(12+4*sin(8*Atan(1))*((jour-b)/(b-a))-(4*Atan(1))/2))*3600;
    else
        dureej=(12+4*sin(8*Atan(1))*((jour-a)/(b-a))-(4*Atan(1))/2))*3600;
/*Répartition des heures de jour autour de midi*/
    midi=input("12:00",time5.);
    debutj=midi-dureej/2;
    finj=midi+dureej/2;
    output;
end;
run;
```

```

/*ETPh : nombre de minutes de jour par tranche horaire*/
data etp2;
do jour="01MAR93"d to "03DEC01"d;
    do heure=0 to 22*3600 by 3600;
        output;
    end;
output;
end;
run;

data etp2 (keep=jour heure ETPh);
merge etp2 etp;
by jour;
debutETP=max(heure,debutj);
finETP=min(heure+3600,finj);
if debutETP < finETP then ETPh=finETP-debutETP;
else ETPh=0;
run;

/*ETPh : Minutes d'ETP par tranche horaire sur les critères:pas d'ETP la nuit
ni qd il pleut*/
libname ruine "M:\SAS\table SAS\";

data etp2;
set etp2;
heure=hour(heure);
run;

data etp2 ;
merge etp2 ruine.pluie2h;
by jour heure;
ETPh=ETPh*indsec;
run;

proc print data=etp2;
format jour date8. ETPh time.;
run;

/*h_ETP : nombre de minutes d'ETP par jour : c'est à dire où il ne pleut pas
et où il fait jour*/
proc means data=etp2 nway noprint;
class jour;
output out=etp3 sum(ETPh)=h_ETP;
format jour date9.;
run;

/*ETP_h : répartition de l'ETP journalier, valeur horaire d'ETP.
ETP horaire = ETP quotidien / h_ETP × ETPh*/
data etp3 (keep=jour heure ETP_h);
merge etp2 etp3 ruine.etp;
by jour;
if h_ETP=0 then ETP_h=0;
else ETP_h=ETPh/h_ETP*ETP__mm_;
if ETP_h=. then delete;
rename ETP_h=ETP;
run;

```

ANNEXE 6 : Base de données 'hydro'

```
proc sort data=ruine.pluie2h;
by jour heure;
run;
```

```
data ruine.hydro;
merge ruine.etph ruine.pluie2h ruine.debith;
by jour heure;
run;
```

```
/*La variable date permet de réaliser les séries chronologiques*/
data ruine.hydro;
set ruine.hydro;
date=dhms(jour,heure,0,0);
/*la fonction dhms permet de construire des dates au format datetime ;
Elle comporte 4 arguments : date, heure, minute, seconde*/
run;
proc print data=ruine.hydro;
format jour date8. date datetime15.;
run;
```

```
/*Données manquantes, vérification*/
proc print data=ruine.hydro;
format jour date8.;
where pluie=. OR ETP=. OR debit=. ;
run;          /*5214 na de debith */
```

ANNEXE 7 : Base de données 'phyto'

```
libname ruine "M:\SAS\table SAS\";
filename cmds dde 'excel|system';

/*****
/*          EXPORTS DE PESTICIDES      */
*****/

%macro ruine_pest;
/*créer des tables vides*/
data ruine.pest;
run;

/*Ouverture feuille Excel*/
%do i=93 %to 99;
data _null_;
fic="M:\donnees\rbdc\p&i..xls";
file cmds;
put '[erreur(0)]';
put '[ouvrir("'" fic ")]';
run;

/*Lecture du pavé de données débit dans la feuille EXCEL*/
filename rpest&i dde "Excel|[p&i..xls]P!L1C1:L400C4";

data rpest&i;
infile rpest&i dlm='09'x dsd notab missover;
informat d $50.;
input d atrazine dea dia;

if d ne '' then do;
    d2=scan(d,2," ");
    d3=scan(d,3," -");
    if d2='' then /*cas des données sans heure*/
        do;
            jour=input(scan(d,1," "),ddmmyy10.);
            heure=0;
            output;
            end;
    else do;
        if d3='' then
            do;
                jour=input(scan(d,1," "),ddmmyy10.);
                heure=input(scan(d,2," "),time5.);
                output;
                end;
            else /*cas des plages horaires*/
                do;
                    jour=input(scan(d,1," -"),ddmmyy10.);
                    heure=input(scan(d,2," -"),time5.);
                    output;
                    jour=input(scan(d,1," -"),ddmmyy10.);
                    heure=input(scan(d,3," -"),time5.);
                    output;
                end;
        end;
    end;
end;
```

```

        end;
end;
run;

/*Fermeture feuille Excel*/
data _null_;
file cmds;
put '[fermer]';
run;

/*Concaténation des données*/

data ruine.pest (drop=d d2 d3);
set ruine.pest rpest&i;
if atrazine eq . and dea eq . and dia eq . then delete;
run;

%end;
%mend ruine_pest;
%ruine_pest;

proc sort data=ruine.pest;
by jour heure;
run;

data ruine.pest;
set ruine.pest;
if atrazine=-9999 then atrazine=. ;
if dea=-9999 then dea=. ;
if dia=-9999 then dia=. ;
heure=hour(heure);
run;

/*Concentration moyenne horaire*/
proc means data=ruine.pest nway noprint;
class jour heure;
output out=ruine.pesth mean(atrazine)=atrazine mean(dea)=dea mean(dia)=dia;
format jour ddmmyy10.;
run;

data ruine.pesth;
set ruine.pesth;
drop _type_ _freq_;
run;

/*Interpolation des valeurs de concentration atrazine dea dia*/
data pesth;
set ruine.pesth;
date=dhms(jour,heure,0,0);
run;

proc expand data=pesth out=test to=hour;
id date;
convert atrazine dea dia;
run;

```

```

data ruine.pesth;
set test;
jour=datepart(date);
heure=hour(date);
if atrazine<0 then atrazine=0;
if dea<0 then dea=0;
if dia<0 then dia=0;
run;

proc print data=ruine.pesth;
run;

/*****
/*          APPORTS          */
*****/
proc sort data=ruine.pesth;
by jour heure;
run;
proc sort data=ruine.apport_pest;
by jour heure;
run;

data ruine.phyto;
merge ruine.pesth ruine.apport_pest;
by jour heure;
run;

proc print data=ruine.phyto;
format jour ddmmyy8.;
run;

```

ANNEXE 8 : Analyse descriptive des données 'hydro'

```
libname ruine "M:\SAS\table SAS\";

data hydro;
set ruine.hydro;
where jour<"01DEC01"d;
annee=year(jour);
run;

/*Les statistiques a analyser sont générées par SAS, puis grâce à la fonction
'export data', les graphes sont réalisés sous Excel.*/

/*****
/*          Débit          */
*****/

proc means data=hydro nway noprint;
class annee mois;
output out=debitmoy1 mean(debit)=debit;
format jour ddmmyy10.;
run;
/*permet de tracer la série chronologique sous Excel*/

proc univariate data=hydro normal plot;
var debit;
output out=debitmoy2 mean=debit std=std min=min max=max;
class mois;
format jour ddmmyy10.;
run;
proc print data=debitmoy2;
run;
/*permet de tracer la tendance sous Excel*/
/*permet de construire le tableau avec moyenne, écart type, min & max*/

proc univariate data=hydro normal plot;
where mois=11;
var debit;
output out=novembre mean=debit std=std min=min max=max;
class annee;
format jour ddmmyy10.;
run;
proc print data=novembre;
run;

proc print data=hydro;
where debit=0;
run;
proc print data=hydro;
where debit>500 and debit<600;
run;
```

```

/*****
/*          Pluie          */
/*****

/*fréquence - occurrence*/
data hydro2;
set hydro;
where pluie>0;
run;
proc freq data=hydro2 noprint;
tables pluie/ out=pluie2;
run;

proc print data=pluie2;
run;
proc print data=hydro;
where mois=6 and annee=1994;
run;

/*graphe des fréquences sous Excel*/

/*tendance ETP & hauteur de pluie par mois*/
/*****

%macro desc(var,table1, table2);
  proc means data=hydro noprint;
  class annee mois;
  var &var;
  output out=&var sum=&var;
  run;

  proc univariate data=&var noprint;
  class mois;
  var &var;
  output out=&table1 mean=&var std=std min=min max=max;
  run;

  proc print data=&table1 noobs;
  title 'Statistiques de la variable' &var;
  run;

  proc univariate data=&var noprint;
  class annee;
  var &var;
  output out=&table2 mean=&var std=std min=min max=max;
  run;

  proc print data=&table2 noobs;
  title 'Statistiques de la variable' &var;
  run;
%mend;

%desc(pluie, pluie2, pluie2);
%desc(ETP, ETPmois, ETPan);

proc print data=pluie;
run;

```

```

/*série chronologique des pluies*/

/*Etude des corrélations linéaires*/
/*à l'heure*/
proc corr data=hydro;
var etp pluie debit;
run;

proc corr data=hydro;
var zlag(etp) zlag(pluie) debit;
run;

/*au mois*/
proc sort data=debitmoy;
by annee mois;
run;
proc sort data=pluie;
by annee mois;
run;
proc sort data=etp;
by annee mois;
run;

data mois;
merge debitmoy1 pluie etp;
by annee mois;
run;
proc corr data=mois;
var debit pluie etp;
run;

/*Etude des corrélations avec des décalages dans le temps*/
data lag (keep=date debit pluie pluie1);
set ruine.hydro;
where jour<"01DEC01"d;
annee=year(jour);
pluie1=lag5(pluie);
run;

proc corr data=lag;
var debit pluie1;
run;

```

ANNEXE 9 : Modélisation du comportement hydrologique du bassin versant

```
libname ruine "M:\SAS\table SAS\";

/*Traitement des données manquantes*/
data hydro (drop=deb);
set ruine.hydro;
retain deb;
/*la fonction 'retain' permet d'avoir accès aux valeurs en t-1*/
q=debit;
if debit ne . then deb=debit;
else debit=deb;
logdeb=log(debit+1);
run;

/*Modélisation à proprement parler*/
proc model data=hydro;
retain s ss;
parms a b;
id date s ss r f q;
sm=60;
if _obs_=1 then do;
s=sm;ss=190;
end;
f=pluie*(s/sm)**.5;
sw=max(0,s+pluie-etp);
r=max(0,sw-sm)+pluie*(1-s/sm)**.5;
s=min(sm,sw);
ss=exp(a)*ss+f;
%pd1(rpdl,10,2,r=both)
logdeb=b*ss+%pd1(rpdl,lag2(log(r*ss+1)));
fit logdeb / out=pred outactual outpredict;
run;
quit;

/*Graphique*/
data pred (keep=date etp pluie debitobs debitpred s ss f r q);
set pred;
by date;
retain debitobs debitpred;
if _type_="ACTUAL" then debitobs=exp(logdeb)-1;
if _type_="PREDICT" then debitpred=exp(logdeb)-1;
if last.date then output;
run;

proc print data=pred;
var date pluie debitobs debitpred r f s ss q etp;
format date datetimel4. pluie etp 4.1 debitobs debitpred s ss f r q 5.1;
run;
```

```

%let datedeb=05JAN1996;
%let datefin=13JAN1996;

filename grafout "D:\Documents and Settings\lesclaux\Mes
documents\G&datedeb..cgm";

goptions reset=all goutmode=append cback=grayff
device=cgmmw6c gsfmode=replace gsfname=grafout
vsize=16 cm hsize=24 cm rotate=landscape gunit=pct
colors=(gray00) ftext=swiss htext=2.5;

axis1 minor=none label=none length=20 cm
order=("&datedeb.:00:00:00"dt to "&datefin.:00:00:00"dt by dtday);
axis2 order=(0 to 500 by 100) minor=none
label=none length=12.5 cm offset=(3 cm,0 cm);
axis3 order=(0 to 10 by 2) minor=none
label=none length=12.5 cm offset=(0 cm,9.5 cm);
symbol1 v=none ci=grayc0 i=join l=1 w=50;
symbol2 v=none ci=gray00 i=join l=1 w=5;
symbol3 v=none ci=gray90 i=needle w=100;
footnote1 "D" "82"x "bit"
c=grayc0 " - Observ" "82"x
c=gray00 " - Pr" "82"x "dit";

proc gplot data=ruine.pred1 gout=work.figures;
where "&datedeb.:00:00:00"dt<=date<"&datefin.:00:00:00"dt;
format date datetime9.;
plot debitobs*date debitpred*date
/ overlay autovref
haxis=axis1 vaxis=axis2 lv=2 lh=3 skipmiss;
plot2 pluie*date / vaxis=axis3 frame;
note a=90
move=(.5 cm,13.5 cm) "D" "82"x "bit (l/h)"
move=(23.8 cm,2.5 cm) "Pluie horaire (mm)";
run;

quit;

```

ANNEXE 10 : Macro %pdl

```

/*****/
/*      S A S      A U T O  ---  Macro Library      */
/*                                                    */
/*      NAME: PDL                                     */
/*      TITLE: Polynomial Distributed Lags for PROC MODEL */
/*      PRODUCT: ETS                                  */
/*      KEYS: PDL, ALMON LAGS, LAG DISTRIBUTIONS, POLYNOMIAL LAGS */
/*                                                    */
/*      SUPPORT: sasdje - Don Erdman                 */
/*                                                    */
/*                                                    DATE: 09JAN85      */
/*                                                    UPDATE: 06SEP88      */
/*                                                    UPDATE: 12JUL89      */
/*                                                    UPDATE: 20OCT93     */
/*                                                    */
/*****/

/*-----*/
*
*      SAS Macro %PDL to generate PROC MODEL code
*      for polynomial distributed lags.
*      (Also called Almon lag distributions.)
*
*      USAGE:
*
*      STEP 1. Call once to define the PDL.
*
*      %PDL(PDLNAME,NLAGS,DEGREE{,R=CODE}{,OUTEST=file})
*
*      'PDLNAME' : a name (up to 8 characters)
*                  that you give to identify the PDL.
*
*      'NLAGS'   : the lag length.
*
*      'DEGREE'  : the degree of the polynomial.
*
*      'R=CODE'  : an optional request for endpoint
*                  restrictions. 'CODE' may be "FIRST"
*                  (for upper), "LAST" (for lower), or
*                  "BOTH" (for both upper and lower).
*                  (See PROC PDLREG.)
*
*      'OUTEST=file' : an optional request to write the
*                  parameter estimates and covariance
*                  matrix to an output file
*
*      STEP 2. Call in one or more equations to use.
*
*      %PDI(PDLNAME,EXPRESSION)
*

```

```

*          'PDLNAME'   : the name of the PDL (must match the
*                        name used in the definition call).
*
*          'EXPRESSION' : a variable or expression to which the
*                        PDL is to be applied.
*
*

```

* NOTES:

- ```

*
* 1. This macro is only used with PROC MODEL.
*
* 2. See the chapter on PROC PDLREG in the SAS/ETS
* User's Guide for a discussion of PDL models and
* endpoint restrictions.
*
* 3. This macro uses a different parameterization than
* PROC PDLREG does, so the parameter estimates for
* the polynomial will not agree with PROC PDLREG.
* The resulting lag coefficients will agree.
*

```

\* EXAMPLES:

- ```

*
* 1. This example models Y as a function of 5 lags
*    of X and the current period X, with the
*    coefficients of X and its lags constrained
*    to follow a 3rd degree polynomial in the lag length.
*

```

```

*          PROC MODEL DATA=A;
*            PARMS INT;
*            %PDL(XPDL,5,3)
*            Y = INT + %PDL(XPDL,X);
*            FIT Y;
*

```

- ```

*
* 2. This example is like the first, but used the
* log of X instead of X.
*

```

```

* PROC MODEL DATA=A;
* PARMS INT;
* %PDL(LOGXPDL,5,3)
* Y = INT + %PDL(LOGXPDL,LOG(X));
* FIT Y;
*

```

```

-----/
%MACRO PDL(ARG1, ARG2, ARG3, R=, OUTEST=);

```

```

%LOCAL PDLNAME NLAG D EXPRESS L I J NR RHI RLOW;

```

```

%LET PDLNAME = %UPCASE(&ARG1);

```

```

%IF %LENGTH(%QUOTE(&PDLNAME)) <= 0 |
%LENGTH(%QUOTE(&PDLNAME)) > 32 %THEN %DO;
 %PUT ERROR: INVALID PDLNAME "&PDLNAME".;
 %IF %LENGTH(%QUOTE(&ARG3))=0 %THEN %QUOTE(.);
 %GOTO EXIT;

```

```

 %END;

%GLOBAL &PDLNAME;

%IF %LENGTH(%QUOTE(&ARG3))>0 %THEN %DO;

 %LET NLAG = %EVAL(&ARG2);
 %IF &NLAG<=0 | &NLAG>500 %THEN %DO;
 %PUT ERROR: Invalid lag length "&NLAG" for PDL "&PDLNAME".;
 %GOTO EXIT;
 %END;
 %LET D = %EVAL(&ARG3);
 %IF &D<0 | &D>32 %THEN %DO;
 %PUT ERROR: Invalid degree "&D" for PDL "&PDLNAME".;
 %GOTO EXIT;
 %END;
 %IF &D > &NLAG %THEN %DO;
%PUT ERROR: Degree "&D" > lag length "&NLAG" for PDL "&PDLNAME".;
 %GOTO EXIT;
 %END;

 %LET RHI = 0; %LET RLOW = 0;
 %IF %LENGTH(%QUOTE(&R))=0 %THEN %LET NR=0;
 %ELSE %DO;
 %IF %UPCASE(%QUOTE(&R))=FIRST %THEN
 %LET RHI = 1;
 %ELSE
 %IF %UPCASE(%QUOTE(&R))=LAST %THEN
 %LET RLOW = 1;
 %ELSE
 %IF %UPCASE(%QUOTE(&R))=BOTH %THEN %DO;
 %LET RHI = 1; %LET RLOW = 1; %END;
 %ELSE %DO;
 %PUT ERROR: Invalid restriction R="&R" for PDL "&PDLNAME".;
 %GOTO EXIT;
 %END;
 %LET NR = %EVAL(&RHI + &RLOW);
 %END;

 %IF &D < &NR %THEN %DO;
%PUT ERROR: Degree "&D" too small for restriction for PDL "&PDLNAME".;
 %GOTO EXIT;
 %END;

 %LET &PDLNAME = &NLAG, &D, &RHI, &RLOW;

 PARMS
 %DO I = &NR %TO &D;
 &PDLNAME._&I
 %END;
 ;

 %IF &NR=1 %THEN %DO;
 %IF &RHI>0 %THEN %DO;
 &PDLNAME._0 =

```

```

%DO I = 1 %TO &D;
 -&PDLNAME._&I*(-1)**&I
%END;
;
%END;
%ELSE
%IF &RLOW>0 %THEN %DO;
 &PDLNAME._0 =
 %DO I = 1 %TO &D;
 -&PDLNAME._&I*(&NLAG+1)**&I
 %END;
 ;
%END;
%ELSE %IF &NR=2 %THEN %DO;
 &PDLNAME._TH =
 %DO I = 2 %TO &D;
 -&PDLNAME._&I*(-1)**&I
 %END;
 ;
 &PDLNAME._TL =
 %DO I = 2 %TO &D;
 -&PDLNAME._&I*(&NLAG+1)**&I
 %END;
 ;
&PDLNAME._1 = (&PDLNAME._TL-&PDLNAME._TH)/(&NLAG+2);
&PDLNAME._0 = &PDLNAME._TH + &PDLNAME._1;
%END;

%DO I = 0 %TO &D;
 LABEL &PDLNAME._&I =
 "PDL(&PDLNAME,&NLAG,&D) parameter for (L)**&I";
%END;

ESTIMATE
%DO I = 0 %TO &NLAG - 1;
 &PDLNAME._L&I,
%END;
%IF %LENGTH(%QUOTE(&OUTEST))>0 %THEN %DO;
 &PDLNAME._L&NLAG ,/ OUTEST=&OUTEST COVOUT;
%END;
%ELSE %DO;
 &PDLNAME._L&NLAG;
%END;

%DO I = 0 %TO &NLAG;
 &PDLNAME._L&I = &PDLNAME._0
 %IF &I>0 %THEN
 %DO J = 1 %TO &D;
 + &PDLNAME._&J
 %IF &I>1 %THEN %DO;
 %IF &J>1 %THEN %DO; * &I**&J %END;
 %ELSE %DO; * &I %END;
 %END;
 %END;
 ;
 LABEL &PDLNAME._L&I =

```

```

 "PDL(&PDLNAME,&NLAG,&D) coefficient for lag&I";
%END;

%END;

%ELSE %DO;
%LET L = %LENGTH(%QUOTE(&&&PDLNAME));
%IF &L<=0 | &L>32 %THEN %DO;
%PUT ERROR: The PDL "&PDLNAME" is not defined.;
.
%GOTO EXIT;
%END;
%LET EXPRESS=%UPCASE(&ARG2);

&PDLNAME._L0*(&EXPRESS)
%LET J = %SCAN(%QUOTE(&&&PDLNAME),1);
%DO I = 1 %TO &J;
+ &PDLNAME._L&I*LAG&I(&EXPRESS)
%END;

%END;

%GOTO ENDIT;
%EXIT;
;ABORT; /* %PDL ERROR INSERTED ABORT STATEMENT */

%ENDIT: %MEND PDL;

```