



n°

15268



Mémoire présenté pour l'obtention du titre de
Docteur de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

"Sciences et Techniques de l'Environnement"

RÉFLEXIONS SUR L'UTILITÉ DES MODÈLES MATHÉMATIQUES DANS LA GESTION DE LA POLLUTION DIFFUSE D'ORIGINE AGRICOLE

par

Luiz Augusto KAUARK LEITE

soutenu le 26 octobre 1990

JURY

M. Stéphane HENIN
M. Rémy POCHAT
M. Pierre BALLAND
M. Ghislain DE MARSILY
M. René BELAMIE
M. Jean Marie MOUCHEL

Directeur de Thèse
Président
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur

RÉSUMÉ

Cette étude comporte deux objectifs principaux. Le premier est de contribuer à l'évaluation des deux approches, empirique et conceptuelle, de modélisation du transport de polluants diffus d'origine agricole quant à leur capacité à représenter l'évolution temporelle des concentrations et des flux des matières en suspension, des nitrates et du phosphore, à l'exutoire d'un petit bassin versant agricole. Nous avons validé deux modèles représentatifs de chacune des approches ; le premier modèle est inspiré des modèles CREAMS et SWRRB et le deuxième est le modèle HSPF.

Le deuxième objectif est d'analyser l'utilité des modèles mathématiques dans la gestion de la pollution diffuse d'origine agricole et ceci par rapport à cinq critères de décision auxquels sont confrontés les gestionnaires : (1) estimation des flux polluants, (2) évaluation du risque de dépassement d'une concentration, (3) description de mécanismes de transport de polluants, (4) détermination et quantification des sources de polluants et (5) évaluation de l'impact sur la qualité de l'eau des changements des pratiques agricoles.

La première partie de ce mémoire décrit les enjeux de la pollution diffuse d'origine agricole, analyse les phases du processus de gestion de la qualité de l'eau dans les bassins versants agricoles et situe les diverses méthodologies d'aide à la gestion dans les différentes étapes de ce processus. On met en évidence de quelle manière la modélisation peut apporter une aide aux gestionnaires et aux décideurs. Elle comporte également une description des différentes étapes de la mise en oeuvre d'un modèle et une analyse des principaux problèmes extrinsèques aux modèles qui limitent leur application par les gestionnaires.

La deuxième partie décrit les mécanismes mis en jeu dans le transport de polluants d'origine diffuse et les principales approches de modélisation de chaque processus individuel par cycle : l'eau, l'érosion, l'azote puis le phosphore. Enfin nous présentons les principaux modèles mathématiques de simulation du transport des polluants agricoles en les classant, en mettant en évidence leurs avantages et leurs inconvénients, et en précisant leur domaine d'application.

La troisième partie présente la démarche de modélisation suivie, les modèles mathématiques utilisés et les résultats obtenus individuellement pour chacun des modèles pour le bassin versant de l'Orgeval (à Mélarchez). Finalement, nous présentons les résultats de nos réflexions sur l'utilité des modèles mathématiques dans la gestion de bassins agricoles afin d'évaluer le réel intérêt d'une telle démarche dans la résolution des problèmes concrets qui sont posés aux gestionnaires.

Considérés comme outils de simulation des concentrations ou des débits à l'exutoire, ces modèles sont trop complexes par rapport à l'information disponible dans les données ce qui conduit à une sous-détermination des paramètres. De plus, l'évolution temporelle des concentrations de polluants à l'exutoire est en général mal représentée notamment lors des événements à fortes concentrations. Considérés comme outils de gestion, ces modèles ne sont guère plus performant dans l'estimation des flux polluants à l'exutoire que des modèles plus simples.

Par ailleurs, ces modèles pourraient en principe simuler l'évolution d'autres variables d'état (e.g., stock d'azote du sol) ou simuler l'impact de changements des pratiques agricoles sur la qualité de l'eau tels que les modifications des surfaces cultivées ou de la rotation de différentes espèces végétales ou des changements dans la quantité ou dans le mode d'apport de fertilisants. Pour cela ils devraient être validés sur leur réalisme physique, c'est-à-dire, sur leur capacité de décrire fidèlement les processus essentiels responsables de la dynamique de polluants dans le bassin versant. Cependant, comme ils ne sont jamais validés sur cette propriété et comme aucune mesure à l'intérieur du bassin ne permet de justifier *a priori* la validité de la représentation, on ne peut encore raisonnablement leur accorder confiance pour la prise de décision en matière de gestion.

Mots-clés : agriculture ; azote ; bassin-versant ; calcul de flux ; érosion ; gestion ; hydrologie ; incertitude ; matières en suspension ; MES ; modèle conceptuel ; modèle empirique ; modèle mathématique ; nitrates ; bassin de l'Orgeval ; phosphore ; pollution ; pollution diffuse ; pratiques agricoles ; qualité de l'eau ; simulation ; validation.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction générale	1
------------------------------------	---

PREMIERE PARTIE : LA POLLUTION DIFFUSE D'ORIGINE AGRICOLE ET LES METHODOLOGIES D'ETUDES

Chapitre 1 - La pollution diffuse d'origine agricole	5
1.1 - Introduction.....	5
1.2 - Les nuisances.....	7
1.2.1 - Eutrophisation.....	8
1.2.2 - Dépassement des normes de potabilité.....	9
1.2.3 - Augmentation du coût et de la complexité du traitement de l'eau.....	10
1.2.4 - Envasement.....	10
1.2.5 - Réduction de la valeur touristique et de loisirs.....	10
1.2.6 - Effets néfastes sur le biotope aquatique.....	11
1.2.7 - Risque dû aux incertitudes.....	11
1.3 - Evaluation des apports diffus.....	12
1.3.1 - Matières en suspension.....	12
1.3.1.1 - A l'échelle de la parcelle.....	12
1.3.1.2 - A l'échelle des bassins versants.....	13
1.3.1.3 - Conclusion	14
1.3.2 - Azote.....	15
1.3.2.1 - Apports atmosphériques.....	15
1.3.2.2 - Pertes vers les nappes.....	16
1.3.2.3 - Pertes à l'échelle de la parcelle.....	16
1.3.2.4 - Pertes à l'échelle des bassins versants.....	17
1.3.2.5 - Conclusion	18
1.3.3 - Phosphore.....	19
1.3.3.1 - Apports atmosphériques.....	20
1.3.3.2 - Ecoulements subsuperficiel et souterrain.....	20
1.3.3.3 - Pertes à l'échelle des bassins versants.....	21
1.3.3.4 - Conclusion	24
Chapitre 2 - Méthodologies d'aide à la gestion de la PDOA	27
2.1 - Gestion de la qualité de l'eau dans les bassins versants agricoles.....	27
2.1.1 - Evaluation du problème.....	27
2.1.2 - Evaluation des alternatives.....	28
2.1.3 - Implantation du programme de contrôle.....	28
2.1.4 - Vérification du programme de contrôle.....	29
2.2 - Objectifs des méthodes.....	29

2.3 - Calcul des flux	30
2.3.1 - Absence de données de débits et de concentrations	31
2.3.1.1 - Coefficients d'exportation	31
2.3.1.2 - Fonctions de charge	32
2.3.2 - Données ponctuelles de concentrations et de débits	33
2.3.3 - Absence de données de concentrations et données de débits en continu	34
2.3.4 - Données de débits en continu et données ponctuelles de concentrations	34
2.3.4.1 - Méthodes par interpolation	35
2.3.4.2 - Méthodes par extrapolation	37
2.3.5 - Comparaison des différentes méthodes de calcul des flux	39
2.4 - Estimation du risque lié au dépassement d'une concentration	40
2.5 - Déterminer et quantifier les sources de polluants	42
2.5.1 - Bilans entrées-sorties	42
2.5.2 - Bassins représentatifs	43
2.6 - Description des mécanismes de transport des polluants	44
2.7 - Choix des pratiques techniquement appropriées	44
2.8 - Déterminer l'efficacité des techniques alternatives	44
2.9 - Déterminer la relation coût-avantage des techniques	45
2.10 - Conclusion	45
Chapitre 3 - Les modèles mathématiques	47
3.1 - Qu'est-ce qu'un modèle?	47
3.2 - Propriétés requises des modèles	48
3.2.1 - Cohérence rationnelle	48
3.2.2 - Ajustement aux données expérimentales	48
3.2.3 - Unicité ou identifiabilité	49
3.2.4 - Minimalité	49
3.2.5 - Falsifiabilité	49
3.2.6 - Pouvoir de prévision	49
3.3 - Mise en oeuvre d'un modèle	49
3.3.1 - Définition du problème	50
3.3.2 - Analyse du système	51
3.3.3 - Construction du modèle	52
3.3.4 - Analyse de sensibilité a priori	54
3.3.5 - Acquisition des données et planification d'expérience	55
3.3.6 - Calibration du modèle	55
3.3.7 - Vérification du modèle	58
3.3.8 - Validation du modèle	58
3.3.8.1 - Critères de qualité d'ajustement	58
3.3.8.2 - Analyse des incertitudes	63
3.3.9 - Analyse du pouvoir de prévision	66
3.4 - Obstacles à l'utilisation des modèles	66
3.4.1 - Communication	66
3.4.2 - Interface entre modèle et utilisateurs	67
3.4.3 - Maintenance	68
3.4.4 - Documentation	68
3.4.5 - Diffusion	68

3.4.6 - Disponibilité des données.....	68
3.4.7 - Formation.....	69
3.5 - Conclusion.....	70

**DEUXIEME PARTIE : LES MECANISMES MIS EN JEU DANS LE TRANSPORT
DE POLLUANTS DIFFUS ET LES PRINCIPALES APPROCHES DE MODELISATION**

Chapitre 4 - Le cycle de l'eau.....	47
4.1 - Description du cycle de l'eau dans un bassin versant.....	73
4.1.1 - Interception.....	74
4.1.2 - Rétention superficielle et stockage superficiel.....	75
4.1.3 - Infiltration.....	75
4.1.4 - Evapotranspiration.....	76
4.1.5 - Ecoulement superficiel ou écoulement hortonien.....	77
4.1.6 - Ecoulement sur des zones saturées.....	78
4.1.7 - Ecoulement sub-superficiel non-saturé.....	78
4.1.8 - Ecoulement sub-superficiel saturé.....	78
4.1.9 - Ecoulement concentré latéral dans le sol.....	79
4.1.10 - Ecoulement souterrain.....	79
4.1.11 - Percolation.....	79
4.1.12 - Ecoulement en canal.....	79
4.2 - Modélisation du cycle de l'eau dans un bassin versant.....	80
4.2.1 - Modèles conceptuels.....	80
4.2.1.1 - Modèles conceptuels "à réservoirs".....	80
4.2.1.2 - Modèles conceptuels à surface de contribution variable.....	88
4.2.2 - Modèles mécanistes ou physiques.....	89
4.3 - Conclusion.....	92
Chapitre 5 - L'érosion dans le bassin versant.....	93
5.1 - Les processus de l'érosion.....	93
5.2 - Typologie de l'érosion par l'eau.....	94
5.2.1 - Erosion en nappes ou inter-rigoles.....	94
5.2.2 - Erosion en rigoles.....	95
5.2.3 - Erosion en ravins.....	95
5.2.4 - Erosion de thalweg.....	95
5.2.5 - Erosion en rivière (ou en canal).....	95
5.3 - Facteurs d'érosion.....	96
5.3.1 - Erosion inter-rigoles et en rigoles.....	96
5.3.1.1 - Hydrologie.....	96
5.3.1.2 - Topographie.....	96
5.3.1.3 - Type de sol.....	97
5.3.1.4 - Couverture végétale.....	97
5.3.1.5 - Pratiques agricoles.....	98
5.3.1.6 - Etat de surface du sol.....	98

5.3.2 - Erosion linéaire.....	98
5.3.2.1 - Débit des surfaces amont.....	98
5.3.2.2 - Type de sol.....	99
5.3.2.3 - Couverture végétale.....	99
5.3.2.4 - Morphologie du canal.....	99
5.4 - Modélisation de l'érosion d'un bassin versant.....	100
5.4.1 - Modèles empiriques.....	100
5.4.1.1 - Equation de Fournier.....	100
5.4.1.2 - Equation de Flaxman.....	100
5.4.1.3 - Equation de Dendy et Bolton.....	101
5.4.1.4 - Equation universelle de perte des sols - USLE.....	101
5.4.1.5 - Equation universelle de perte des sols modifiée - MUSLE.....	103
5.4.2 - Modèles conceptuels.....	103
5.4.2.1 - Equation de Onstad et Foster - OF.....	103
5.4.2.2 - Modèle érosion-sédimentation.....	104
5.4.2.3 - Modèle de Negev.....	105
5.4.2.4 - Modèle ANSWERS.....	107
5.4.3 - Modèles mécanistes.....	107
5.4.3.1 - Modèle de Foster et Meyer.....	108
5.4.3.2 - Modèle de l'Université du Colorado.....	109
5.5 - Conclusion.....	110
Chapitre 6 - Le cycle de l'azote.....	113
6.1 - Description du cycle de l'azote dans le sol.....	113
6.1.1 - L'azote dans le sol.....	113
6.1.2 - Le cycle de l'azote dans le sol.....	114
6.1.2.1 - Minéralisation.....	115
6.1.2.2 - Immobilisation.....	115
6.1.2.3 - Fixation de l'azote atmosphérique.....	115
6.1.2.4 - Fixation de l'azote ammoniacal par le sol.....	116
6.1.2.5 - Pertes par voies gazeuses.....	116
6.1.2.6 - Apports météoriques.....	117
6.1.2.7 - Absorption d'azote par les plantes.....	118
6.1.2.8 - Fertilisation.....	118
6.1.2.9 - Pertes par voies hydriques.....	118
6.2 - Dynamique de l'azote dans le sol.....	119
6.3 - Principaux facteurs influençant le cycle de l'azote.....	120
6.3.1 - Humidité du sol.....	120
6.3.2 - Température du sol.....	120
6.3.3 - Aération du sol.....	121
6.3.4 - pH.....	121
6.3.5 - Matière organique.....	121
6.3.6 - Pratiques agricoles.....	122
6.4 - Modélisation du cycle de l'azote.....	123
6.4.1 - Modèles des transformations biochimiques de l'azote dans le sol.....	123
6.4.1.1 - Modèles entrée-sortie.....	123
6.4.1.2 - Modèles conceptuels.....	124

6.4.2 - Cinétiques des transformations biochimiques de l'azote dans le sol	129
6.4.3 - Modélisation du transport de l'azote	131
6.4.4 - Modélisation de l'absorption de l'azote par les plantes	132
6.5 - Conclusion	133
Chapitre 7 - Le cycle du phosphore.....	135
7.1 - Description du cycle du phosphore dans le sol.....	135
7.1.1 - Le phosphore dans le sol.....	135
7.1.2 - Le cycle du phosphore.....	137
7.1.2.1 - Adsorption et désorption des ions phosphatés dans le sol.....	137
7.1.2.2 - Minéralisation et immobilisation du phosphore dans les sols.....	138
7.1.2.3 - Apports météoriques.....	139
7.1.2.5 - Fertilisation	140
7.1.2.6 - Pertes par voies hydriques.....	141
7.2 - La biodisponibilité du phosphore.....	141
7.3 - Principaux facteurs influençant le cycle du phosphore.....	144
7.3.1 - Température.....	144
7.3.2 - pH.....	144
7.3.3 - Sels dissous.....	145
7.3.4 - Temps.....	145
7.4 - Modélisation du cycle du phosphore.....	145
7.4.1 - Modèles des transferts et des transformations biochimiques du phosphore	145
7.4.1.1 - Modèles entrée-sortie.....	145
7.4.1.2 - Modèles conceptuels.....	146
7.4.2 - Absorption du phosphore par les plantes.....	150
7.4.3 - Modélisation du transport du phosphore dissous.....	150
7.4.4 - Modélisation de la perte de phosphore particulaire.....	150
7.5 - Conclusion.....	151

**TROISIEME PARTIE : LES MODELES CONCEPTUELS DE SIMULATION
DE LA POLLUTION DIFFUSE D'ORIGINE AGRICOLE.**

Chapitre 8 - Modèles de simulation de la PDOA.....	153
8.1 - Historique.....	153
8.2 - Caractéristiques de modèles conceptuels.....	154
8.2.1 - Structure des modèles.....	155
8.2.2 - Echelle.....	155
8.2.3 - Eléments simulés.....	156
8.2.4 - Pas de temps.....	156
8.2.5 - Calibration.....	156
8.3 - Modèles conceptuels de simulation de la PDOA.....	157
8.3.2 - SPNM : sediment-phosphorus-nitrogen model.....	158
8.3.3 - ARM : agricultural runoff management model.....	159
8.3.4 - CNS : Cornell nutrient simulation model.....	161
8.3.5 - CPM : Cornell pesticide model.....	162
8.3.6 - CREAMS : chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems.....	163

8.3.7 - HSPF : hydrological simulation program-fortran	165
8.3.8 - Modèle bassin versant.....	167
8.3.9 - BICHE : bilan chimique des eaux.....	169
8.3.10 - SWRRB : simulator for water resources in rural basins	170
8.3.11 - MORELN : modèle de lessivage de nitrates	171
8.4 - Conclusion.....	171
Chapitre 9 - Méthodologie de l'étude	175
9.1 - Objectifs	175
9.2 - Choix des modèles et des méthodes.....	176
9.3 - Site expérimental.....	177
9.3.1 - Caractéristiques physiques	177
9.3.2 - Equipements et données disponibles	178
9.3.3 - Description qualitative de la circulation de l'eau dans le bassin.....	178
9.4 - Description des algorithmes des transformations biogéochimiques	179
9.4.1 - Cinétiques du premier ordre.....	180
9.4.2 - Modèles d'équilibre.....	181
9.4.3 - Méthodes numériques de résolution des équations.....	181
9.5 - Critères et méthodes de calage et validation.....	182
9.5.1 - Calage.....	182
9.5.2 - Critères d'évaluation de la qualité de l'ajustement	183
9.5.3 - Analyse des incertitudes de la modélisation	185
Chapitre 10 - Modèle CREAMS modifié bassin versant - CB	189
10.1 - Description du modèle.....	189
10.1.1 - Modèle hydrologique.....	190
10.1.1.1 - Fonction de production	191
10.1.1.2 - Fonction de transfert.....	198
10.1.2 - Modèle érosion.....	198
10.1.3 - Modèle azote.....	199
10.1.3.1 - Transformations biochimiques.....	200
10.1.3.2 - Absorption de l'azote nitrique par les plantes.....	202
10.1.3.3 - Transfert de l'azote	203
10.1.4 - Modèle phosphore.....	204
10.1.4.1 - Phosphore dissous	204
10.1.4.2 - Phosphore particulaire	205
10.2 - Détermination des valeurs des paramètres	205
10.2.1 - Modèle hydrologique.....	205
10.2.2 - Modèle érosion.....	208
10.2.3 - Modèle azote.....	209
10.2.4 - Modèle phosphore.....	211
10.3 - Validation du modèle.....	211
10.3.1 - Modèle hydrologique.....	211
10.3.1.1 - Analyse de la qualité de l'ajustement.....	211
10.3.1.2 - Analyse des incertitudes	215

10.3.2 - Modèle érosion.....	221
10.3.2.1 - Analyse de la qualité de l'ajustement.....	221
10.3.2.2 - Essais de perfectionnement du modèle.....	225
10.3.3 - Modèle azote.....	226
10.3.3.1 - Analyse de la qualité de l'ajustement.....	226
10.3.3.2 - Analyse des incertitudes.....	229
10.3.4 - Modèle phosphore.....	231
10.3.4.1 - Analyse de la qualité de l'ajustement.....	231
10.3.4.2 - Analyse des incertitudes.....	236
10.4 - Conclusion.....	239
Chapitre 11 - Modèle "Hydrological Simulation Program Fortran" - HSPF	241
11.1 - Description du modèle.....	241
11.1.1 - Modèle hydrologique.....	242
11.1.1.1 - Interception.....	244
11.1.1.2 - Infiltration.....	244
11.1.1.3 - Ecoulement rapide.....	246
11.1.1.4 - Ecoulement moyen.....	248
11.1.1.5 - Percolation.....	248
11.1.1.6 - Alimentation du réservoir inférieur.....	248
11.1.1.7 - Ecoulement lent.....	249
11.1.1.8 - Evapotranspiration.....	249
11.1.2 - Modèle érosion.....	252
11.1.2.1 - Détachement des sols par les pluies.....	253
11.1.2.2 - Transport des sédiments par l'écoulement superficiel.....	253
11.1.2.3 - Ravinement des sols.....	253
11.1.3 - Modèle azote.....	254
11.1.3.1 - Fonction de transfert.....	254
11.1.3.2 - Transformations biochimiques.....	255
11.1.3.3 - Température du sol.....	256
11.2 - Calibration du modèle.....	257
11.2.1 - Modèle hydrologique.....	257
11.2.2 - Modèle érosion.....	259
11.2.3 - Modèle azote.....	259
11.2.3 - Modèle phosphore.....	260
11.3 - Validation du modèle.....	261
11.3.1 - Modèle hydrologique.....	261
11.3.1.1 - Analyse de la qualité de l'ajustement.....	261
11.3.1.2 - Analyse des incertitudes.....	264
11.3.2 - Modèle érosion.....	268
11.3.2.1 - Analyse de la qualité de l'ajustement.....	268
11.3.2.2 - Analyse des incertitudes.....	274
11.3.3 - Modèle azote.....	277
11.3.3.1 - Analyse de la qualité de l'ajustement.....	277
11.3.3.2 - Analyse des incertitudes.....	280

11.3.4 - Modèle phosphore.....	281
11.3.4.1 - Analyse de la qualité de l'ajustement	281
11.3.4.2 - Analyse des incertitudes	285
11.4 - Conclusion.....	289
Chapitre 12 - Comparaison des méthodologies d'étude de la pollution diffuse d'origine agricole et réflexions sur l'utilité des modèles mathématiques	293
12.1 - Introduction.....	293
12.2 - Calcul des flux.....	294
12.2.1 - Matières en suspension	294
12.2.1.1 - Méthodes alternatives pour le calcul des flux de MES	294
12.2.1.2 - Comparaison des méthodologies pour le calcul des flux du MES.....	297
12.2.2 - Azote.....	298
12.2.2.1 - Méthodes alternatives pour le calcul des flux de nitrates.....	298
12.2.2.2 - Comparaison des méthodologies pour le calcul des flux de nitrates	303
12.2.3 - Phosphore	304
12.2.3.1 - Méthodes alternatives pour le calcul de flux de phosphore dissous	304
12.2.3.2 - Comparaison des méthodologies pour le calcul des flux du phosphore.....	306
12.2.4 - Utilité des modèles mathématiques de simulation dans le calcul des flux polluants....	308
12.3 - Estimation du risque lié au dépassement d'une concentration	310
12.4 - Détermination et quantification des sources de polluants.....	311
12.5 - Description des mécanismes de transport des polluants.....	312
12.6 - Evaluation de l'impact des techniques agricoles sur la qualité de l'eau.....	313
12.7 - Conclusion.....	314
Conclusion générale.....	317
Références bibliographiques.....	323

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'évolution importante de la production et des techniques agricoles dans l'après-guerre a eu de très grandes répercussions sur la qualité des milieux aquatiques, avec, en particulier, un accroissement de la pollution par les nitrates et de l'eutrophisation. Cependant, ce n'est que dans les dernières années que l'agriculture a été reconnue réellement comme une activité qui peut contribuer à la dégradation de l'environnement. Il s'agit d'un problème mondial qui touche également un nombre croissant de régions dans le monde et qui risque de devenir un des principaux problèmes d'environnement dans les années à venir.

Le grand défi qui est donc posé aujourd'hui est de passer de l'ère du "produire plus" à celle du "produire mieux", car comme l'a rappelé très justement M. Robert Foulhouze, Président du CORPEN, *"il n'y a pas d'exemple où, à long terme, les intérêts de l'agriculture et ceux de l'environnement ne soient pas cohérents"*.

Ces pollutions sont essentiellement d'origine diffuse et les pratiques agricoles constituent sans doute l'origine essentielle. Par sa nature diffuse, la pollution agricole ne peut être concentrée en un même lieu en vue d'un traitement ultérieur. La réduction de ce type de pollution passe donc par un contrôle à la source, c'est-à-dire, par la modification de l'ensemble des techniques et des pratiques mises en oeuvre afin de réduire les pertes de polluants.

La mise en place d'une gestion intégrée des ressources naturelles rend donc nécessaire la mise en oeuvre de méthodologies prenant en compte les multiples facteurs (agronomiques, climatiques, hydrologiques, ...) qui interviennent dans le transfert des polluants et permettant de dégager les politiques pour minimiser ses effets. Parmi ces méthodologies, les modèles mathématiques de simulation sont des puissants outils potentiels.

Les efforts de recherche dans la compréhension du cycle de l'eau et des polluants dans un bassin versant alliés à l'avènement de l'ordinateur ont abouti dans les vingt dernières années au développement de nombreux modèles mathématiques (plus ou moins empiriques) dont l'objectif est de prévoir la future distribution (en quantité et qualité) des ressources en eau dans le temps et dans l'espace et de mieux comprendre les mécanismes physiques, chimiques et biologiques mis en jeu.

Malgré leur potentiel important, ces outils sont rarement utilisés dans la gestion des eaux et plus particulièrement dans la gestion des bassins agricoles. Nous avons entrepris ce travail dans le but d'analyser ce manque de crédibilité des modèles mathématiques souvent exprimé par les gestionnaires et de contribuer à l'évaluation de leurs capacités à résoudre les problèmes posés.

Dans le cadre de cet étude, nous nous sommes intéressés à la modélisation mathématique du transport des *matières en suspension*, des *nitrates* et du *phosphore* (dissous et particulaire) vers les *eaux superficielles* à l'échelle des petits bassins versants agricoles. En effet, une des motivations de ce travail vient de notre expérience antérieure dans la gestion de bassins versants agricoles au Brésil (Minas Gerais) qui présentent des problèmes considérables de pollution des eaux superficielles dûs à l'activité agricole.

La réflexion sur les raisons extrinsèques aux modèles de leur non-utilisation a été basée d'une part, sur notre modeste expérience (passée) dans la gestion de l'eau et (présente) dans la modélisation et d'autre part, sur une analyse bibliographique de la question.

En ce qui concerne les raisons intrinsèques et donc l'évaluation proprement dites des outils, notre démarche a consisté, après une analyse exhaustive des modèles existants dans la littérature, à évaluer les deux grandes approches de modélisation du transport de polluants d'origine agricole.

En réalité, on ne trouve dans la littérature que des modèles qui semblent "bien marcher" et comme les modèles qui ne "marchent" pas ne sont pas publiés on peut "seulement" conclure, par tautologie, que les modèles fonctionnent bien. Par ailleurs, étant donné que la performance d'un modèle tend à être interprétée comme un jugement sur le modélisateur lui-même, sa compétence et son talent, ses publications tendent à être biaisées par l'optimisme. Tout se passe comme si les auteurs de modèles, se confondant avec ceux-ci, se trouvaient blessés dans

leur existence s'il y avait infirmation des principes de base sur lesquels repose leur modélisation. Des évaluations critiques des modèles sont à l'heure actuelle très rares, voir inexistantes.

Comme l'a fort bien souligné Klemes (1986), si on veut assurer au moins une modeste crédibilité aux modèles mathématiques de simulation, un minimum d'évaluation de ces outils est nécessaire sous peine de retomber dans les sciences de l'eau rejoignant l'alchimie et l'astrologie dans les annales du dilettantisme.

Nous avons mis en évidence (Kauark Leite, 1986) deux familles de modèles de simulation de la pollution diffuse d'origine agricole (PDOA). La première décrit les processus mis en jeu par des représentations très simplifiées, plus souvent empiriques, en établissant une relation quantitative entre les paramètres du modèle et les caractéristiques physiques facilement mesurables du bassin versant. La deuxième, plus fidèle à la description détaillée des phénomènes, fait appel à des représentations beaucoup plus complexes afin de mieux décrire la dynamique des mécanismes mis en jeu. Etant donné que dans ce dernier cas les paramètres sont dépourvus de réalité physique (il est probable qu'ils ont un sens physique mais il est improbable qu'ils correspondent à des caractéristiques physiquement mesurables sur le terrain) ces modèles font appel à des séries historiques de données pour calibrer les paramètres.

Nous nous sommes inspiré des modèles CREAMS (Knisel, 1980) et SWRRB (Williams et al., 1980) pour mettre en oeuvre un modèle représentatif de la première approche de modélisation et nous avons choisi le modèle HSPF (Johanson et al., 1984) comme représentant de la deuxième famille de modèles.

Nous avons testé ces deux modèles sur le bassin représentatif de l'Orgeval (sous-bassin de Méry-sur-Oise, 7 km²) situé dans le département de Seine et Marne, dans le Bassin Parisien dont l'occupation est principalement représentée par une céréaliculture intensive. Ce bassin est géré par le CEMAGREF depuis 1962 pour l'hydrologie et depuis 1975 pour la qualité de l'eau constituant ainsi, à notre connaissance, la plus grande base de données en France pour l'étude de la pollution diffuse d'origine agricole.

Avant d'aborder le plan de thèse proprement dit, nous aimerions souligner trois motivations qui ont motivé la rédaction de ce mémoire.

La première est de situer notre travail dans le contexte de la gestion de l'eau, c'est-à-dire, non seulement par rapport aux différentes phases du processus de gestion mais aussi par rapport aux autres méthodologies généralement employées dans chaque phase. Nous espérons ainsi que l'idée abstraite du modèle comme instrument d'aide à la décision qu'aurait pu avoir le lecteur puisse se rattacher à des besoins concrets des gestionnaires.

La seconde, répond à un souci de synthèse bibliographique. En effet, la description des mécanismes de la pollution en jeu et des approches de leur modélisation sont complètement dispersées dans la littérature. Le travail de compilation et d'analyse de tout ce matériel nous a demandé un effort considérable. Il nous semble donc qu'une synthèse bibliographique conséquente permettra non seulement une meilleure compréhension des modèles présentés et de leurs limitations mais aussi aidera également à ceux qui veulent s'initier à la modélisation d'aller directement dans le vif du sujet sans avoir à refaire tout le parcours fastidieux de recherche bibliographique. Une bonne connaissance des procédures et des algorithmes utilisés dans les modèles est, à notre avis, une condition *sine qua non* pour la réussite de leur utilisation. Par ailleurs, il n'existe, à notre connaissance, aucune synthèse sur le sujet en France.

Enfin, notre troisième souci a été d'être le plus compréhensible possible afin d'être accessible aux non-modélisateurs. Les résultats de l'exercice de modélisation sont généralement reportés dans un jargon difficilement compréhensible pour les non-avertis, parsemé d'équations aux différentielles et de complexes algorithmes mathématiques dont on se demande parfois s'ils peuvent être compris par d'autres que ceux travaillant directement sur le sujet (et qui ont bien sûr le temps de les lire). Par conséquent, nous pouvons être conduits à entrer dans le détail de certaines démonstrations ou à présenter des exemples de calcul même si ceux-ci peuvent apparaître élémentaires. Nous partageons l'avis de Gaston Bachelard (*in*, La formation de l'esprit scientifique) qui affirmait: "*nous ne devons pas non plus hésiter à multiplier les exemples si nous voulons donner l'impression que, sur toutes les questions, pour tous les phénomènes, il faut passer d'abord de l'image à la forme géométrique, puis de la forme géométrique à la forme abstraite, pour suivre la voie psychologique normale de la pensée scientifique*".

La première partie de ce rapport a pour objectif de décrire les enjeux de la pollution diffuse d'origine agricole (chapitre 1), d'analyser les phases du processus de gestion de la qualité de l'eau dans les bassins agricoles et de situer les diverses méthodologies d'aide à la gestion dans les différentes étapes de ce processus (chapitre 2). On pourra mettre en évidence de quelle manière la modélisation peut apporter une aide aux gestionnaires et décideurs (chapitre 2). Elle comporte également une description des différentes étapes de la mise en oeuvre d'un modèle et une analyse des principaux problèmes extrinsèques aux modèles qui freinent leur application (chapitre 3).

La **deuxième partie** décrit les mécanismes mis en jeu dans le transport de polluants d'origine diffuse et les principales approches de modélisation de chaque processus individuel. Pour une question de présentation nous avons divisé cette description par cycle : l'eau (chapitre 4), l'érosion (chapitre 5), l'azote (chapitre 6) puis le phosphore (chapitre 7). Enfin nous présenterons les principaux modèles mathématiques de simulation du transport des polluants diffus d'origine agricole en essayant de les classer, de mettre en évidence leurs avantages et leurs inconvénients et de préciser leur domaine d'application (chapitre 8).

Dans la **troisième partie**, nous présentons la démarche de modélisation suivie (chapitre 9), les modèles mathématiques utilisés et les résultats obtenus individuellement pour chacun des modèles dans la simulation des cycles de l'eau, de l'érosion, de l'azote et du phosphore dans le bassin versant de l'Orgeval (à Mélarchez) (chapitres 10 et 11). Cette phase de l'étude a bénéficié de la collaboration de Saskia Holthuijsen (1989) de l'Université Technique de Delft (Pays-Bas) et de Larbi Ouahni (1989) de l'Ecole Hassania de Casablanca (Maroc) durant leur travail de fin d'études au CERGRENE. Finalement, nous réaliserons une comparaison entre la modélisation et les autres méthodologies classiques d'aide à la gestion afin d'évaluer le réel intérêt d'une telle approche dans la solution des problèmes concrets qui sont posés aux gestionnaires (chapitre 12).

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les enjeux

On assiste au cours des dernières années à une préoccupation accrue pour la pollution diffuse d'origine agricole, non seulement de la part des gestionnaires de l'eau mais de toute la société en général. L'intérêt pour les sources diffuses de pollution d'origine agricole s'est manifesté d'avantage lorsque les efforts sur les sources ponctuelles domestiques et industrielles ont abouti à la réduction de la plupart des "points noirs" de pollution. Actuellement, il est renforcé car les problèmes de nutriments (e.g., nitrates, eutrophisation, ...) et de substances toxiques (e.g., pesticides, métaux lourds, PCB, ...) sont devenus inquiétants et on a pris conscience que leurs impacts sur l'environnement constituent un coût important pour la collectivité.

Le défi qui est donc posé à notre société est de promouvoir le développement économique, en particulier agricole, en harmonie avec une protection de l'environnement efficace et équitable. La mise en place d'une gestion intégrée des ressources naturelles rend nécessaire la mise en oeuvre de méthodologies prenant en compte les multiples facteurs (agronomiques, climatologiques, hydrologiques, ...) qui interviennent dans le transport des polluants et permettent de dégager les politiques pour minimiser ses effets. Parmi ces méthodologies, les modèles mathématiques de simulation sont de puissants outils potentiels.

Parmi les problèmes liés à la PDOA posés aux gestionnaires de l'eau et dont les modèles mathématiques peuvent contribuer à la solution on distingue : dans la phase de diagnostic, (1) le calcul des flux polluants, (2) le calcul du risque lié au dépassement d'une concentration ; dans la phase d'évaluation, (3) la détermination et quantification des sources de polluants, (4) la description des mécanismes de transport de polluants ; dans la phase d'évaluation d'alternatives de contrôle, (5) l'estimation de l'impact des changements des pratiques agricoles sur la qualité de l'eau.

Le développement des études sur les systèmes complexes et particulièrement les milieux naturels (e.g., bassins versants, rivières, lacs, nappes, estuaires, ...) associé au développement de l'informatique et à la vulgarisation des ordinateurs ont provoqué au cours des vingt dernières années une prolifération des modèles mathématiques dont la littérature des sciences de l'eau regorge. Cependant, il faut bien reconnaître que ces modèles n'ont pas toujours apporté ce qu'on attendait pour la connaissance ou pour la maîtrise des systèmes étudiés.

La diversité des points de vue, principalement en ce qui concerne les méthodes d'élaboration et de validation, a parfois provoqué chez certains chercheurs ou gestionnaires une suspicion bien compréhensible quant à l'intérêt des modèles. Il apparaît donc important de préciser certains critères que les modèles doivent essayer de respecter pour être plus crédibles. Parmi ces principes nous citons : (1) la cohérence rationnelle, (2) l'ajustement aux données expérimentales, (3) l'unicité ou l'identifiabilité, (4) la minimalité, (5) la falsifiabilité et (6) le pouvoir de prévision.

Indépendamment de la justesse intrinsèque des modèles mathématiques, c'est-à-dire, le respect des critères mentionnés ci-dessus, des raisons extrinsèques aux modèles contribuent à leur non-utilisation dans la gestion des eaux. Les principales contraintes à l'utilisation des modèles qui ne s'attachent pas directement à la crédibilité sur la performance des modèles eux-mêmes mais qui sont plutôt d'ordre comportemental, psychologique, logistique ou pédagogique sont : (1) la communication entre modélisateurs et non-modélisateurs, (2) l'interface entre le modèle et l'utilisateur, (3) la maintenance, (4) la documentation, (5) la diffusion, (6) la disponibilité des données et (7) la formation des utilisateurs. Actuellement, la mise en cause de modèles par les gestionnaires ne nous semble pas venir d'une critique fondée sur leur performance. En effet, on ne trouve dans la littérature que des modèles qui semblent "bien marcher". Comme les modèles qui ne "marchent" pas ne sont pas publiés, on peut seulement conclure, par tautologie, que les modèles fonctionnent bien. Il nous semble donc que les obstacles à l'utilisation des modèles dans la gestion de l'eau sont beaucoup plus liés aux raisons extrinsèques qu'aux raisons intrinsèques. Il nous paraît important que modélisateurs et utilisateurs soient attentifs à ces points qui bloquent la possibilité d'utiliser la capacité qu'offrent les modèles d'une meilleure compréhension des systèmes naturels, pour une meilleure gestion de l'environnement.

Malgré le nombre croissant d'applications des modèles de simulation de la PDOA reportées dans la littérature, des exemples d'études sérieuses de validation des modèles sont rares dans la littérature des sciences de l'eau. Malheureusement, beaucoup plus de chercheurs et d'ingénieurs se sont intéressés à l'élaboration des modèles mathématiques qu'à leur validation objective. Par ailleurs, il faut signaler le manque des données adaptées à la validation des modèles, qu'il s'agisse des sous-modèles hydrologique, érosion, azote ou phosphore. Ce sombre tableau ne peut pas être expliqué seulement par une absence de moyens mis en oeuvre mais il est également la conséquence de l'absence de communication entre expérimentateurs et modélisateurs.

Dans le domaine de la PDOA, nous avons mis en évidence deux grandes approches de modélisation en fonction du type d'équations utilisées pour simuler les processus à l'origine du transport de polluants. La première approche utilise des algorithmes empiriques mais dont les paramètres bénéficient d'une relation fonctionnelle avec des caractéristiques physiques du bassin versant. De ce fait, ces modèles seraient indépendants de toute calibration. L'intérêt d'une telle approche consiste d'une part, à utiliser les relations empiriques entre les paramètres du modèle et les caractéristiques (physiques et d'utilisation du sol) du bassin versant pour prévoir l'impact des changements des pratiques agricoles sur la qualité des eaux et d'autre part, à estimer la perte des polluants vers les milieux aquatiques dans les bassins versants non-jaugés. La deuxième approche utilise un niveau de représentation plus fin du bassin versant dans l'espoir de mieux simuler son comportement. Dans ce cas, les algorithmes adoptés sont dépourvus de réalisme physique et les paramètres du modèle doivent être calés.

La validation des approches empirique et conceptuel

L'objectif principal de notre étude a été de contribuer à la validation de ces deux approches en utilisant deux modèles, chacun représentatif d'une des approches. Comme un modèle est indissociable de son objectif et comme cet objectif n'est pas simplement de décrire l'objet modélisé mais de répondre à différentes questions posées, nous avons analysé l'utilité des modèles mathématiques de simulation de la PDOA par rapport aux principaux problèmes auxquels sont confrontés les gestionnaires.

Comme représentant de la première approche, nous avons mis au point un modèle conceptuel de simulation (modèle CB) des débits liquide et solide, des flux et des concentrations de nitrates, de phosphore dissous et de phosphore particulaire à l'exutoire d'un petit bassin versant agricole. Ce modèle s'est inspiré des algorithmes des modèles CREAMS et SWRRB. Le modèle HSPF a été choisi comme représentant de la deuxième approche de modélisation car il s'agit du modèle conceptuel de simulation de la PDOA le plus complet publié jusqu'à présent dans la littérature. Ces modèles ont été testés avec la base de données hydrologiques, de qualité de l'eau (1975-1987) et agronomiques du bassin versant de l'Orgeval (à Mélarchez) dont l'occupation est principalement représentée par une céréaliculture intensive. Ce bassin constitue, à notre connaissance, la plus grande base de données pour l'étude de la pollution diffuse d'origine agricole en France et probablement dans le monde.

Les sous-modèles hydrologiques CB (avec calibration) et HSPF ont donné des résultats comparables avec une simulation raisonnable des débits à l'exutoire du bassin de Mélarchez. Toutefois ces modèles présentent les mêmes difficultés pour simuler certains événements, notamment les crues de printemps et d'été isolées et la reprise des écoulements en fin d'automne ou en début d'hiver après des périodes d'étiage prolongé. Ces modèles souffrent donc des "maladies" déjà signalées dans la littérature sur d'autres modèles conceptuels pluie-débit.

La décomposition du débit à l'exutoire en divers types d'écoulements, faites par les deux sous-modèles hydrologiques, sont très différentes. Dans les deux cas, il est très difficile d'altérer ce partage sans une dégradation significative de la qualité de la simulation des débits moyens journaliers. Ce comportement des modèles hydrologiques aura donc un impact certain sur la simulation de la qualité de l'eau.

L'utilisation du modèle hydrologique CB, sans calibration des paramètres, pour simuler les débits à l'exutoire a donné des résultats légèrement inférieurs aux modèles avec calibration. Cependant, l'hypothèse de généralité du modèle CB lui permettant de s'appliquer à des sites non-jaugés, qui semble vérifiée à Mélarchez, doit faire l'objet d'une vérification plus large si on veut l'utiliser en prévision.

Nous avons constaté que l'équation universelle de perte des sols modifiée (MUSLE) surestime considérablement l'érosion sur le bassin versant de Mélarchez, ce qui semble indiquer une inaptitude de cette équation à simuler les flux de MES à l'exutoire des bassins versants à faible érosion. Avec calibration des paramètres de l'indice d'érosivité, la MUSLE perd son caractère universel et devient une simple relation flux-débit. Les essais de perfectionnement du modèle par l'introduction des intensités de pluies et de l'humidité du sol simulée par le modèle hydrologique n'ont apporté aucune amélioration significative de l'estimation des flux de MES.

Le sous-modèle érosion HSPF a très mal simulé l'évolution des concentration de MES ainsi que des flux à l'exutoire de Mélarchez. Ces résultats sont d'une part, dûs à l'utilisation d'une seule année comme échantillon de

calibration et d'autre part, à une forte dépendance du modèle érosion à la décomposition des écoulements dont la distribution n'était pas modifiable de par la structure du modèle hydrologique.

La simulation des concentrations en nitrates à l'exutoire de Mélarchez a montré une incapacité des modèles CB et HSPF à simuler les périodes de grand lessivage et tout particulièrement les épisodes où les concentrations dépassent 25 mg N-NO₃/l. Ce comportement ne semble pas être dû seulement aux erreurs de simulation du modèle hydrologique mais également à la simulation de l'évolution de la concentration en azote nitrique dans le sol. Des phénomènes de courte durée doivent jouer un rôle certain dans cette évolution comme par exemple une forte minéralisation pendant une période chaude et sèche et une dénitrification importante après l'arrivée des pluies. En ce qui concerne la simulation des flux de nitrates, les performances des modèles CB et HSPF sont comparables car la variabilité des flux est expliquée pour l'essentiel par les débits

L'analyse de l'évolution des séries de concentrations en phosphore et de celles de débits semble indiquer une probabilité élevée d'avoir une composante importante du flux de phosphore dissous à l'exutoire de Mélarchez provenant des sources ponctuelles domestiques de pollution. L'absence d'une estimation précise de la pollution domestique et de son évolution dans le temps rend impossible toute modélisation des pertes de phosphore d'origine diffuse. Par ailleurs, les phénomènes ayant lieu dans le cours d'eau, notamment la sédimentation-relargage et les réactions d'adsorption-désorption, viennent ajouter une complication supplémentaire.

La simulation par le modèle CB des concentrations de phosphore dissous, avec les hypothèses de dilution en hiver et d'augmentation de la concentration en phosphore dissous pendant la saison estivale par les sources ponctuelles, représentent raisonnablement l'évolution saisonnière des concentrations à l'exutoire du bassin de Mélarchez. Par contre, notamment pendant les mois à très fortes charges en phosphore dissous, le modèle sous-estime systématiquement les flux. La simulation par le modèle HSPF des flux de phosphore dissous, sans la prise en compte des sources ponctuelles, les a nettement sous-estimés.

L'analyse des incertitudes des paramètres des modèles CB et HSPF a mis en évidence de très fortes intercorrélations. Cette interdépendance alliée au nombre des paramètres explique sans doute les difficultés rencontrées lors de la calibration. Par ailleurs, l'analyse de l'information nécessaire à la calibration des paramètres a montré que la précision des paramètres ne s'améliore pas significativement à partir de trois années de données sauf dans le cas du sous-modèle érosion HSPF où ce n'est qu'à partir de trois années de données qu'on atteint un niveau d'information minimal capable d'identifier les paramètres.

Utilité des modèles mathématiques dans la gestion de la pollution agricole

La comparaison des méthodologies de calcul de flux polluants à l'exutoire des bassins agricoles nous montre que :

- en l'absence de données de concentration et de débit les relations statistiques (*i.e.*, coefficients d'exportation) sont très peu précises et l'intervalle de confiance de l'estimation est du même ordre que l'intervalle entre le minimum et le maximum des données utilisées pour établir ces relations.
- l'introduction de l'information sur les débits à Mélarchez par l'intermédiaire de sa mesure en continu réduit très peu l'incertitude sur les flux de polluants à l'exutoire.
- un protocole usuel d'échantillonnage avec une mesure de la concentration et du débit chaque mois réduit considérablement l'incertitude sur les flux par rapport aux relations statistiques mais le flux moyen annuel calculé ainsi à Mélarchez peut varier (à un niveau de confiance de 95%) entre $\pm 100%$, $\pm 36%$ et $\pm 43%$ du flux réel de MES, de nitrates et du phosphore dissous.
- si l'on dispose de la mesure du débit en continu, l'application des modèles mathématiques CB et HSPF pour simuler les flux moyens annuels des polluants n'améliore pas l'incertitude sur le calcul de flux par rapport aux méthodes d'extrapolation concentration-débit.
- ***en l'absence de données de concentration et de débit sur toute la période sur laquelle on désire calculer le flux, le couplage entre un modèle de simulation pluie-débit et une relation linéaire entre flux et débit s'avère le moyen le mieux adaptée à l'estimation du flux moyen annuel des polluants à l'exutoire de Mélarchez.*** Avec une relation flux-débit calibrée avec une seule année de données, le flux moyen annuel calculé à Mélarchez peut varier (à un niveau de confiance de 95%) entre $\pm 32%$, $\pm 29%$ et $\pm 32%$ du flux réel de MES, de nitrates et de phosphore dissous.

Les résultats obtenus par la simulation des concentrations de MES et de nitrates ont montré que les écarts de simulation sont d'autant plus importants que les concentrations sont élevées. Par ailleurs les distributions de probabilités des concentrations calculées par les modèles sont très différentes de celles observées réellement. Par conséquent, *les résultats des simulations de qualité des eaux sur le bassin versant de Mélarchez ne permettent pas d'envisager l'utilisation des modèles mathématiques conceptuels pour l'estimation du risque lié au dépassement d'une concentration.*

La condition préalable et fondamentale à l'utilisation des modèles pour : (1) déterminer et quantifier les différentes sources de pollution dans un bassin versant, (2) décrire les mécanismes de transport des polluants et (3) évaluer l'impact de changement des pratiques agricoles sur la qualité de l'eau, est le réalisme physique. Il est à notre avis indispensable que les modèles, soient-ils conceptuels ou mécanistes, représentent le plus fidèlement possible les vrais processus ayant lieu sur le bassin versant.

L'analyse de modèles existants dans la littérature nous indique que la génération actuelle des modèles de simulation de la PDOA est basée sur des modèles hydrologiques qui ont été conçus non pour décrire le cycle de l'eau dans un bassin versant mais simplement pour simuler le débit total à l'exutoire. Par conséquent, il est peu probable que les représentations du cycle de l'eau soient physiquement réalistes quelle que soit la valeur conceptuelle de ces représentations.

Si l'on raisonne par l'absurde et l'on admet l'hypothèse que les représentations du cycle de l'eau et des cycles biogéochimiques des modèles de simulation de la PDOA sont physiquement réalistes, il est fondamental que cette hypothèse soit validée non seulement sur une variable d'état en sortie de bassin mais sur un ensemble de variables d'état. Or, nous avons vu au cours de ce mémoire qu'aucun des modèles n'a été l'objet de tests rigoureux de validation. Ceci est principalement dû à l'absence de données adaptées à accomplir une telle tâche. Par conséquent, *l'absence de validation des modèles sur leur réalisme physique ne permet pas de les utiliser actuellement pour déterminer et quantifier les différentes sources de pollution dans un bassin versant, pour décrire les mécanismes de transport des polluants et pour évaluer l'impact de changement des pratiques agricoles sur la qualité de l'eau.*

Afin d'augmenter le réalisme physique des représentations, pour certains modèles, on a procédé à une augmentation du niveau de la description du système dans l'espoir d'être plus proche du réel. Nous considérons une telle démarche scientifiquement douteuse car elle ne respecte pas le principe fondamental de minimalité. L'analyse des incertitudes des paramètres nous a donné plusieurs exemples montrant que la complexité des structures et le grand nombre de paramètres sont bien au-delà de la "carrying capacity" de l'information contenue dans les séries de données des débits et de concentrations de polluants à l'exutoire du bassin versant de Mélarchez. Une représentation plus complexe n'est justifiable que si elle augmente la compréhension du système. Comme l'a affirmé Thom (1974) *"ce qui doit être considéré comme essentiel de l'activité scientifique c'est la simplification de la description, la réduction de l'arbitraire dans la description."*

Epilogue

Il nous paraît que cet état de choses où les modèles ont été placés au-dessus de la connaissance sur laquelle ils sont basés vient en grande partie du fait que la recherche en hydrologie au sens large (*i.e.*, "toute action, étude ou recherche qui se rapporte à l'eau, au cycle de l'eau et à leurs applications", Roche, 1986) a été développée pour résoudre des problèmes pratiques humains et non en vue d'augmenter la connaissance sur l'eau. Ainsi la recherche a été guidée par la technique et comme l'a affirmé très justement Braben (1985), *"research driven by a technique ... seems to be a poor bet, since almost invariably the technician's skill is a solution looking for a problem"*. Les motivations d'une grande partie de la recherche en hydrologie amènent Klemes (1986) à conclure que l'hydrologie n'a pas encore été consolidée en tant que science. Cette perspective historique de l'hydrologie ne se justifie pas bien sûr par une volonté délibérée de nos "ancêtres" hydrologues mais parce que les techniques développées ont été capables et suffisantes pour résoudre la plupart des problèmes pratiques posés et par conséquent il y a eu peu d'efforts d'approfondissement de la connaissance scientifique de certains aspects de l'hydrologie.

Cependant, il y a actuellement trois importantes raisons pour que la perspective hydrologique vienne à prendre une nouvelle tournure (Klemes, 1988) : (1) l'accroissement de l'échelle des interférences humaines dans l'environnement (*e.g.*, changement du climat, pollution des nappes, risques technologiques, croissance de la population, ...), (2) le développement des techniques d'observation et de mesures (*e.g.*, les mesures par radar, télédétection, ...) et (3) la coopération et l'interdépendance croissante entre les sciences bio-géophysiques, où le transport des polluants d'origine diffuse dans les bassins versants est un exemple typique. La pratique courante sur laquelle la génération actuelle des modèles mathématiques de simulation de la PDOA a été développée qui se traduit par la séquence *application → données → compréhension* doit être remplacée par l'ordre inverse *compréhension → données → application* (Dooge, 1987).

L'exemple donné dans ce travail d'utilisation des modèles mathématiques pour la simulation de la PDOA nous indique qu'on est loin d'avoir des outils performants. L'analyse de l'utilité de ces modèles mathématiques que ce soit dans un but de recherche ou dans un but de gestion montre qu'ils apportent relativement peu par rapport aux autres méthodologies existantes. Ce constat d'échec ne doit pas être considéré comme un constat d'échec de la modélisation en tant que méthode scientifique mais plutôt comme la mise en évidence de la difficulté pour les sciences de l'eau de décrire le réel.

Il nous semble donc fondamental qu'une symbiose s'installe entre modélisateurs, expérimentateurs et scientifiques du milieu naturel afin de conjuguer leurs efforts dans l'étude du cycle de l'eau dans toutes ses dimensions, théorique et expérimentation sur le terrain. L'accent doit être mis, à notre avis, sur les processus hydrologiques fondamentaux et sur la compréhension des mécanismes (physiques, chimiques et biologiques) qui en sont à la base.

Dans l'accomplissement de cette difficile tâche, la réelle utilité des modèles mathématiques réside dans la synthèse architecturée de connaissances et la possibilité d'une meilleure compréhension du comportement des systèmes naturels complexes. Le *mathématisme* sera alors non seulement descriptif mais aussi formateur et jouera son vrai rôle dans l'avancée des connaissances.