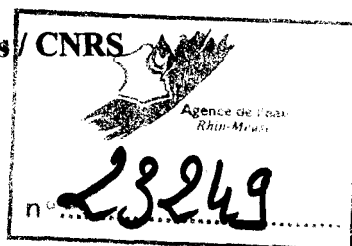


UNIVERSITE LOUIS PASTEUR STRASBOURG 1



Centre d'Études et de Recherches Eco-Géographiques /



THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de
Docteur de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg

Spécialité : Sciences de l'Eau

Par

Abdeslam BOUCHTI

**Modélisation spatialisée des flux hydriques
dans le système Sol-Plante-Atmosphère. Application à
l'estimation de la recharge de la nappe phréatique de la plaine d'Alsace.**

Soutenance le 17 décembre 1998 devant le jury constitué de :

MM.	Ph. ACKERER	Examineur
	J. HUMBERT	Directeur de thèse
	J. P. LABORDE	Rapporteur externe
	T. LEVIANDIER	Membre invité
	P. PAUL	Rapporteur interne
	M. VAUCLIN	Rapporteur externe
	L. ZILLIOX	Membre invité

Tables des matières

Introduction générale.....	9
 Première partie : concepts et bases théoriques 	
Chapitre 1 : concepts du mécanisme de la recharge et facteurs de contrôle.....	.13
1.1. Généralités sur les transferts hydriques en zone non saturée..	.13
1.2. Définition de la recharge.....	15
1.3. Les mécanismes de la recharge naturelle par les pluies..	.15
1.4. Les facteurs influençant la recharge..	16
1.4.1. Le climat..	16
1.4.2. La nature du sol.....	17
1.4.3. La géomorphologie locale.....	17
1.4.4. La couverture végétale.....	.17
1.4.5. La profondeur de la nappe.....	.18
1.4.6. Conclusion.....	18
1.5. Les différentes méthodes de calcul de la recharge via la zone non saturée..	.21
1.5.1. Les techniques hydrologiques..	22
1.5.1.1. La méthode de bilan hydrique..	22
1.5.1.1.1. Les lysimètres..	.22
1.5.1.1.2. Les méthodes climatiques.....	23
1.5.1.1.3. Les mesures d'humidité du sol..	.23
1.5.1.2. La méthode du bilan de Thomthwaite..	.24
1.5.2. La méthode des traceurs chimiques..	.25
1.5.2.1. La méthode du bilan de Chlore..	.26
1.5.2.2. La méthode des isotopes stables..	.26
1.5.3. La méthode inverse.....	26
1.6. Conclusion.....	28
Chapitre 2 : description des modèles de bilan hydrique utilisés.....	29
2.1. Quantification des flux hydriques dans le système Sol-Plante-Atmosphère.....	.29
2.1.1. Méthode du Bilan Hydrique - Méthode stationnaire.....	31
2.1.2. Equation de Richards - Méthode dynamique..	31
2.1.3. Modèles de simulation du bilan hydrique et estimation de la recharge.....	.33
2.2. Description générale et base théorique des modèles utilisés..	.33
2.2.1. Le modèle EARTH.....	33
2.2.1.1. Postulats et hypothèses de départ..	.35
2.2.1.2. Gestion de la réserve en eau.....	35
2.2.1.2.1. Choix du pas de temps..	.35
2.2.1.2.2. Conditions initiales.....	36
2.2.1.3. Régulation de l'évapotranspiration réelle..	.37

2.2.1.4. Paramètres du modèle	39
2.2.2. Le modèle BYM	40
2.2.2.1. Postulats et hypothèses de départ	40
2.2.2.2. Gestion de la réserve en eau	41
2.2.2.3. Régulation de l'évapotranspiration réelle	42
2.2.2.3.1. Régulation de l'évaporation réelle	42
2.2.2.3.2. Régulation de la transpiration réelle	43
2.2.3. Le modèle hydrodynamique : Équation de Richards	43
2.2.3.1. Caractéristiques hydrodynamiques	44
2.2.3.1.1. La relation pression-teneur en eau	44
2.2.3.1.2. La relation conductivité hydrodynamique-teneur en eau	44
2.2.3.2. Formulation pratique de l'équation d'écoulement	45
2.2.3.3. Conditions initiales et aux limites	47
2.2.3.3.1. Conditions initiales	47
2.2.3.3.2. Conditions aux limites	47
2.2.3.3.2.1. Conditions aux limites inférieures	47
2.2.3.3.2.2. Conditions aux limites supérieures	47
2.3. Conclusion	48
Chapitre 3 : changement d'échelle en hydrologie	51
3.1. Généralités	51
3.2. Notion d'échelles espace-temps en hydrologie	51
3.3. Discrétisation spatiale et transferts d'échelles	53
3.4. La modélisation spatialisée	54
3.4.1. les modèles hydrologiques	56
3.4.2. les modèles atmosphériques	56
3.5. Conclusion	57
 Deuxième Partie : Etude stationnelle de la recharge de la nappe par les pluies	
Chapitre 4 : la zone d'étude - la plaine du centre Alsace	59
4.1. Le découpage géomorphologique de la plaine du Rhin supérieur (Unités naturelles) ...	59
4.2. Géologie	61
4.3. Hydrologie	62
4.3.1. Niveau piézométrique	62
4.3.2. Recharge par les pluies	63
4.3.3. Recharge par le réseau hydrographique	64
4.4. Le climat	64
4.4.1. Les températures	64
4.4.2. Les précipitations	65
4.5. Les sols	67
4.5.1. Les domaines alluviaux	67
4.5.2. La pédologie	67
4.5.3. La carte des réserves utiles	70
4.6. L'occupation du sol	72
4.7. Conclusion	74

Chapitre 5 : les parcelles expérimentales	75
5.1. Localisation et caractéristique des sites.....	75
5.1.1. Caractéristiques pédologiques de sites.....	76
5.1.2. Caractéristiques hydrodynamiques.....	76
5.1.2.1. Par méthodes expérimentales.....	77
5.1.2.1.1. Au laboratoire.....	77
5.1.2.1.2. In situ.....	77
5.1.2.2. Par méthodes texturales.....	77
5.2. Les mesures des teneurs en eau.....	77
5.2.1. Sonde à neutrons.....	77
5.2.2. Sonde TDR.....	79
5.2.2.1. Principe physique.....	79
5.2.2.2. Réflectométrie dans le domaine temporel.....	79
5.2.2.3. Relation de permittivité électrique - teneur en eau.....	80
5.2.2.4. Utilisation de la méthode.....	80
5.2.3. Eléments de comparaison des méthodes neutronique et TDR.....	81
5.2.4. Avantages et inconvénients des deux méthodes.....	82
5.3 . Suivis expérimentaux de terrain.....	83
5.3.1 Campagne de mesures à Colmar 1992.....	83
5.3.2 Campagne de mesures dans la plaine centre Alsace 1994-1995.....	84
5.4. Conclusion.....	84
 Chapitre 6 : Analyse des données expérimentales	 85
6.1. Mesures neutroniques et analyse critique de la méthode.....	85
6.1.1. Correction du stock.....	85
6.1.2. Incertitude sur le stock en eau.....	85
6.1.3. Utilisation pratique de la droite de régression.....	86
6.1.4. Confiance à accorder à un échantillon étendu.....	87
6.1.5. Exemple d'illustration : le site de Sélestat.....	87
6.2. Validation de la méthode TDR.....	90
6.3. Comparaison des méthodes neutronique et TDR.....	91
6.4. Campagne de mesures à Colmar sous maïs 1992.....	93
6.5. Résultats de la campagne de mesures 1994-1995.....	96
6.5.1. Teneur en eau.....	96
6.5.2. Stock en eau.....	98
6.6. Mesure des charges hydrauliques.....	102
6.7. Conclusion.....	108
 Chapitre 7 : Simulation multi-modèles et validation multi-critères	 109
7.1. Simulation par les deux modèles analogiques EARTH et BYM.....	109
7.1.1. Calibration.....	109
7.1.2. Validation.....	112
7.1.3. Intercomparaison des résultats de simulation des deux modèles.....	115
7.1.4. Quelques résultats des simulations du modèle EARTH.....	117
7.1.5. Analyse de sensibilité du modèle EARTH.....	122
7.1.5.1. Albédo.....	123

7.1.5.2. Profondeur d'enracinement.....	.123
7.1.5.3. Réserve utile unitaire (mm/dm de sol)123
7.1.5.4. Résistance minimale de structure.....	124
7.1.5.5. Constante C de l'humidité relative de surface..124
7.2. Simulation par le modèle hydrodynamique.....	124
7.2.1. Résultats de simulation sur le site de Colmar.....	.125
7.2.1.1. Paramètres hydrodynamique du site.....	.125
7.2.1.2. Conditions initiales.....	125
7.2.1.3. Conditions aux limites.....	126
7.2.1.4. Calibration et Validation du modèle.....	.127
7.2.1.4. Intercomparaison du drainage profond simulé par les deux modèles	
7.2.2. Résultats de simulation par le modèle hydrodynamique sur le site d'Illhaeusern	
7.2.2.1. Caractéristiques hydrodynamique du site.....	130
7.2.2.2. Conditions initiales.....	130
7.2.2.3. Conditions aux limites.....	131
7.2.2.4. Calibration et validation du modèle.....	.132
7.2.2.5. Intercomparaison du drainage profond simulé par les deux modèles	
7.3. Résultats et discussion.....	134
7.4. Conclusion.....	137

Troisième partie : modélisation spatialisée

Chapitre 8 : cartographie des variables d'entrée et des paramètres du modèle.....139

8.1. Zonages des variables d'entrée d'ordre climatique.....	.139
8.2. La spatialisation des paramètres du modèle.....	.141
8.2.1. Paramètres liés au sol.....	142
8.2.1.1. Techniques de spatialisation.....	.142
8.2.1.2. Carte des profondeurs et des réserves utiles.....	.142
8.2.2. Paramètres liés à l'occupation du sol.....	145
8.2.2.1. L'albédo.....	145
8.2.2.2. La résistance minimale de structure.....	147
8.3. Conclusion.....	.149

Chapitre 9 : la modélisation spatialisée..... 151

9.1. Les modifications effectuées sur le modèle.....	151
9.2. Distribution spatiale des flux hydriques.....	155
9.2.1. Résultats de simulation au pas 100 m sur une zone élémentaire (microscale).....	157
9.2.2. Résultats de simulation au pas de 1km sur la zone élémentaire (mésoscale).....	161
9.2.3. Effets de changements d'échelles.....	164
9.3. Résultats à l'échelle de la zone d'étude pour une année 1994.....	167
9.4 Conclusion.....	.171

Conclusion générale..... 173

Bibliographie177
Annexes :	
Annexes 1 : Dispositifs et mesures expérimentales sur les quatre parcelles	193
Annexe I-1 : le site de Colmar..193
Annexe I-2 : le site d'Illhaeusern	209
Annexe I-3 : le site de Sélestat..215
Annexe I-4 : le site de Strasbourg	230
Annexe II : Analyse de sensibilité..237
Annexe III : Essai de cartographie de l'évapotranspiration réelle et de la recharge sous conditions climatiques et de couvert végétal unique fictives..248
Liste des figures et tableaux	251
Liste des principaux symboles	257

Introduction générale

L'analyse du cycle de l'eau repose sur l'appréciation quantitative, dans le cadre d'un bilan, des termes impliqués dans les transferts entre les diverses composantes du système sol-végétation-atmosphère. Les particularités de ces transferts présentent un intérêt qui ne se limite pas à la science du sol, mais s'étend à l'hydrologie, à l'hydrogéologie et à la météorologie, par leur influence sur l'état hydrique du sol dans la zone non saturée et le comportement des nappes souterraines à l'échelle locale comme à l'échelle régionale. La zone non saturée constitue vraisemblablement la partie la plus délicate à étudier tant pour l'hydrologie de surface, que pour l'hydrologie souterraine (Hillel, 1974).

Durant les vingt dernières années, les recherches en hydrologie ont révélé l'importance de la zone non saturée, notamment en tant que zone de transfert, à travers laquelle les nappes se rechargent, mais aussi en tant que zone dans laquelle les transports de contaminants par les flux hydriques à partir des couches surfaciques, sont atténués, immobilisés, ou transmis vers la nappe. Par conséquent, la conscience de la complexité de cette zone s'est très développée.

La zone non saturée est un domaine d'une excessive hétérogénéité spatiale et temporelle des facteurs qui contrôlent le mouvement de l'eau et des solutés. Réalisés en régime transitoire, ces écoulements sont lents, occasionnellement instables et varient souvent dans l'espace. La présence d'écoulements préférentiels dans certains cas augmente la complexité du problème (Gee et Hillel, 1988). En hydrologie comme en science de l'atmosphère, de nombreuses méthodes ont été développées pour étudier le problème essentiellement à l'échelle locale. La plupart de ces méthodes se heurtent au problème du passage à l'échelle régionale, notamment du fait de la forte hétérogénéité des paramètres de surface, et donc de la difficulté de les spatialiser (WMO, 1990 ; IAHS, 1993).

L'approche consistant à modéliser les transferts d'eau dans la zone non saturée peut constituer un *outil de spatialisation*, mais en aucun cas remplacer les différentes méthodes de mesures qui doivent être utilisées comme support de validation des résultats issus des modèles. L'intérêt fondamental apporté par les modèles réside surtout dans leur capacité d'extension spatiale et temporelle.

L'importance de la nappe phréatique de la plaine d'Alsace et l'enjeu qu'elle représente du point de vue économique et environnemental, a suscité l'élaboration de plusieurs programmes de recherches de protection de la ressource en eau contre la pollution d'origine agricole ou industrielle, compte tenu de sa vulnérabilité, due notamment à sa proximité de la surface du sol. On peut citer, parmi ces organismes :

- des institutions régionales comme la DIREN, le SEMA-Alsace, ou encore des associations telles que l'APRONA (Association pour la Protection de la Nappe Phréatique de la Plaine d'Alsace), l'ARAA (Association pour la Relance Agronomique en Alsace),
- des institutions nationales telles que le Ministère de l'Environnement, le CNRS (à travers les ex-programmes PIREN-Eau et les actuels programmes Systèmes Ecologiques et Actions de l'Homme «SEAH» du Programme Environnement, Vie et Sociétés), le

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), . . . ;

- des programmes internationaux, comme le programme transfrontalier **REKLIP** (Regio Klima Project), le programme **LIFE**, . . . ;

Ce travail constitue une suite logique et complémentaire des travaux antérieurs, effectués dans le cadre du programme **PIREN-Eau/Alsace**, dont une grande partie était focalisée sur l'estimation des paramètres physiques du milieu, la modélisation des mécanismes de transfert de flux hydrique et de soluté (essentiellement les nitrates) vers la nappe via la zone non saturée (rapports **PIREN-Eau/Alsace**, 1984, 1989, 1995). La plupart des études relatives à la Plaine d'Alsace ont été effectuées sur le secteur du Ried Central de l'III, à l'échelle locale (Bernard, 1985; Kugler, 1988 ; Estèves, 1989 ; Laigle, 1991 ; Martelat, 1993 ; Ackerer et Zilliox, 1990 ; Lehmann, 1996) puis à une échelle plus étendue (Zilliox et al. 1995). Dans le contexte local, Martelat (1993) a ainsi montré que la distribution spatiale des paramètres hydrodynamiques du sol sur un domaine réduit (1.5 km²), discrétisé en mailles de 50 m x 50 m, est caractérisé par une forte dispersion et ne présente aucun déterminisme, ce qui se traduit par une forte diversité des flux hydriques parvenant à la nappe. Par contre, à l'échelle de la plaine d'Alsace (2800 km²), la méthode développée au **CEREG** utilisant un modèle spatialisé s'appuyant sur une cartographie de la réserve utile des sols et introduisant une répartition des cultures selon une procédure de tirage au hasard a montré que l'occupation du sol a une influence primordiale sur la recharge (Humbert, 1994).

L'interaction des différents processus d'échanges entre le système alluvial, le réseau hydrographique, le climat et les changements d'occupation du sol rend difficile la compréhension du fonctionnement hydrologique du système. Un intérêt particulier est accordé, ces derniers temps, aux changements climatiques et aux activités anthropiques (agriculture et urbanisation) à cause de leur forte influence sur le fonctionnement global de l'aquifère. Gudera (1996) attribue le renouvellement de la réserve en eau de l'aquifère en grande partie aux échanges superficiels (précipitations). Il se réfère aux résultats du modèle transfrontalier multicouches **Strasbourg/Offenburg**, en évaluant les infiltrations des cours d'eau à 540 millions de m³ par an, soit 62 % du bilan hydraulique. L'effet de drainage par les cours d'eau s'élève pour sa part à environ 560 millions de m³ par an, soit 65 % du bilan. Les mêmes résultats ont été confirmés par le modèle monocouche dans le même secteur (Martin, 1996) et par des mesures effectuées sur le secteur de Colmar (Humbert, 1994). Il s'est avéré nécessaire de mener une étude à l'échelle régionale des échanges de la nappe avec les changements des conditions de surface, pouvant apporter quelques éléments de réponse à la compréhension de son fonctionnement hydrologique.

L'objectif de la thèse est orienté principalement vers la quantification au pas de temps journalier de l'apport à la nappe phréatique d'Alsace par les précipitations efficaces. Elle porte également sur l'estimation spatialisée de l'évapotranspiration réelle et de la réserve en eau des sols. Dans ce contexte, il est apparu indispensable de mettre en oeuvre des travaux scientifiques permettant d'aborder ces questions sur la base d'une meilleure connaissance du fonctionnement hydrique du système sol-plante-atmosphère et de ses conséquences sur le transfert d'eau vers la nappe, dans l'optique générale d'une meilleure gestion de l'utilisation des sols et de la ressource en eau.

Pour atteindre cet objectif, nous développons une double approche fondée :

- d'une part, sur l'acquisition de mesures *in situ*, durant une période de 18 mois, concernant quatre sites représentatifs de la zone d'étude ;

- de l'autre, sur une modélisation stationnelle, puis spatialisée, plus conceptuelle que celles qui ont été suivies jusqu'alors pour l'étude de la recharge de la nappe phréatique par les précipitations.

Ce rapport de thèse est constitué de trois parties.

La première partie

Une analyse bibliographique approfondie sur les méthodes d'estimation de la recharge de nappe et des facteurs qui la contrôlent (chapitre 1), montre que la modélisation du bilan hydrique paraît mieux adaptée à notre objectif. Trois modèles déterministes : le modèle EARTH¹, le modèle BYM² et le modèle hydrodynamique³ sont exposés en détail (chapitre 2). L'analyse bibliographique des méthodes de spatialisation en hydrologie et en climatologie, nous a permis de choisir le modèle qui semblait le mieux adapté à notre situation (EARTH), notamment en fonction de l'étendue de la surface de l'étude (environ 1700 km²) et de la résolution spatiale la plus significative pour l'analyse des flux hydrique dans le système sol-plante-atmosphère (chapitre 3).

La deuxième partie

Elle est consacrée tout d'abord à la description du milieu physique de la zone d'étude (chapitre 4). L'implantation des quatre sites de mesures sur des unités morfo-pédologiques représentatives, le suivi expérimental pendant une période de 18 mois (chapitre 5) et l'analyse des chroniques de mesures (chapitre 6), constituent un support adéquat pour une validation multi-modèles. Les trois modèles ont été validés par rapport à deux variables. Une deuxième validation a été réalisée par inter-comparaison des résultats des trois modèles (chapitre 7). L'inter-comparaison des résultats de simulation des trois modèles a montré une concordance satisfaisante sachant qu'ils sont basés sur des hypothèses de départ et des concepts différents. Le modèle EARTH paraît cependant mieux adapté à une étude régionale du fait de sa souplesse et sa faible exigence en paramètres. L'analyse de sensibilité du modèle permet de dégager les quatre paramètres physiques les plus sensibles à la variabilité spatiale, liés au sol (profondeur du sol, réserve utile unitaire) et à la végétation (résistance de structure, albédo).

La troisième partie

Elle fait l'objet d'un exposé des méthodes utilisées pour la spatialisation des paramètres de type sol, de type plante et des variables d'entrée du modèle (chapitre 8). Le modèle utilisé pour la spatialisation a été modifié de manière à effectuer le calcul du bilan hydrique en chaque noeud d'un maillage régulier sur toute la zone-test. La procédure permet de calculer, en chaque noeud de la grille (selon un pas d'espace variable), le drainage profond (recharge nette), ainsi que l'ETR (chapitre 9). L'analyse des résultats de simulation spatialisée à deux échelles 100 m et 1 km a permis de quantifier la recharge de la nappe et de mettre en évidence la forte variabilité de cette dernière sur la zone d'étude.

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre du Programme Environnement, Vie et Sociétés du CNRS, et plus spécifiquement au sein du Programme SEAH/Rhin-Supérieur (Systèmes Ecologiques et Actions de l'Homme).

¹ élaboré par E. Choïsnel à Météo-France (1985) et modifié par A. Bouchti et N. Mahr au CEREG (1998)

² élaboré par N. Brisson à l'INRA d'Avignon (1989).

³ modifié par F. Lehmann à l'IMFS (1996)

Résumé

Modélisation spatialisée des flux hydriques dans le système Sol-Végétation-Atmosphère Application à l'estimation de la recharge de la nappe phréatique de la plaine d'Alsace

L'importance de la nappe phréatique de la plaine d'Alsace et l'enjeu qu'elle représente du point de vue économique et environnemental, a suscité l'élaboration de plusieurs programmes de recherches de protection de la **ressource** en eau contre la pollution d'origine agricole ou industrielle. Ce travail est orienté principalement vers la quantification au pas de temps journalier de l'apport à la nappe phréatique par les précipitations efficaces. Dans ce contexte, il est apparu indispensable de mettre en oeuvre des travaux scientifiques permettant d'aborder ces questions sur la base d'une meilleure connaissance du fonctionnement hydrique du système sol-plante-atmosphère et de ses conséquences sur le transfert d'eau vers la nappe. Pour cela, nous avons développé une approche, basée sur des mesures *in situ*, de la modélisation stationnelle et spatialisée, plus conceptuelle que celles qui ont été suivies jusqu'alors pour l'étude de la recharge de la nappe phréatique par les précipitations.

Le suivi expérimental pendant une période de 18 mois et l'analyse des chroniques de mesures, constituent un support **adéquat** pour une validation multi-modèles. Trois modèles ont été validés par rapport à **deux** variables **au moins**. Une deuxième validation a été réalisée par inter-comparaison des résultats des trois modèles. Le modèle **EARTH** (Choisnel, 1985) paraît cependant mieux adapté à une étude régionale à cause de sa souplesse et de sa faible exigence en paramètres.

La spatialisation des paramètres de type sol a été réalisée à partir de la carte pédologique de la zone d'étude située entre Colmar et Strasbourg (1700 km²). La cartographie des paramètres de type plante a été déduite de la carte d'occupation du sol obtenue par image satellitaire. Le modèle a été modifié de **manière** à effectuer le calcul du bilan hydrique en chaque **nœud** d'un maillage régulier sur la zone d'étude. La procédure permet de calculer, en chaque **nœud** de la grille (selon un pas d'espace variable), le drainage profond (recharge nette), l'**ETR**, les températures à différentes profondeurs du sol, ainsi que tous les termes du bilan d'énergie. L'analyse des résultats de simulation spatialisée à deux échelles 100 m et 1 km a permis la quantification de la recharge de la nappe et la mise en évidence de la forte variabilité de cette dernière sur la zone d'étude.

Mots clés : sol-plante-atmosphère, modèle, bilan hydrique, carte **pédologique**, carte d'occupation du sol, spatialisation, recharge de la nappe.

Abstract

Spatialized modeling of water flow in the Soil-Vegetation-Atmosphere system. Application to the ground water recharge estimation of the Alsace plain

The importance of the groundwater of the Alsace plain and the important role which it represents from an economic and environmental standpoint, **caused** the development of several research **programs** concerning protection of the water **resource** against the pollution of agrarian or industrial origin. In **this context**, it was thus interesting to undertake a regional study to concretely **evaluate** the refill of the **groundwater** by the rains and to appreciate the **effect** of the conditions of surface on the **transfer** of meteoric water towards the aquifer. In **this context**, it appeared essential to **conduct** scientific work making it possible to tackle these questions on the basis of better knowledge of the hydrous functioning of the system **Soil-Vegetation-Atmosphere**. We develop an approach based on an **in situ experimentation**, followed by a spatialized modeling, applied to a zone between Strasbourg and Colmar (1700 km²). The step used is more **conceptual** than those which were followed hitherto for the study of the refill of the groundwater **by precipitation**.

The three models were validated to respect to two variables at least. A second validation was **carried out** by inter-comparison of the results of three models.

A **cartography** of the physical soil characteristics (texture classification, useful reserve in particular) was **carried out** by digitalization of the maps of the arable lands. The cartography of the farming occupation was **carried out** starting from image processing of American satellite LANDSAT TM with high resolution. The model used for spatialization was modified so as to carry out the water balance calculation in each node of a **regular grid** on the **entire** studies zone. The **procedure** makes it possible to calculate, in each node of the grid (according to a variable unit of space), the subsoil drain (clear refill), as well as the AET. It provides **moreover** all the terms of the assessment of energy as well as the temperature in the soil at depths of 0.1 m, 0.5 m and 1 m of deep. Analysis of simulating results with 100m and 1km meshes resolution have allowed quantification of groundwater recharge and displayed a strong spatial variability of thesis on the studies area.

Key-words: Sol-Vegetation-atmosphere, water balance modeling, pedological map, land cover, map spatialisation, groundwater recharge net.

Résumé

Modélisation spatialisée des flux hydriques dans le système Sol-Végétation-Atmosphère Application à l'estimation de la recharge de la nappe phréatique de la plaine d'Alsace

L'importance de la nappe phréatique de la plaine d'Alsace et l'enjeu qu'elle représente du point de vue économique et environnemental, a suscité l'élaboration de plusieurs programmes de recherches de protection de la ressource en eau contre la pollution d'origine agricole ou industrielle. Ce travail est orienté principalement vers la quantification au pas de temps journalier de l'apport à la nappe phréatique par les précipitations efficaces. Dans ce contexte, il est apparu indispensable de mettre en oeuvre des travaux scientifiques permettant d'aborder ces questions sur la base d'une meilleure connaissance du fonctionnement hydrique du système sol-plante-atmosphère et de ses conséquences sur le transfert d'eau vers la nappe. Pour cela, nous avons développé une approche, basée sur des mesures in situ, de la modélisation stationnelle et spatialisée, plus conceptuelle que celles qui ont été suivies jusqu'alors pour l'étude de la recharge de la nappe phréatique par les précipitations.

Le suivi expérimental pendant une période de 18 mois et l'analyse des chroniques de mesures, constituent un support adéquat pour une validation multi-modèles. Trois modèles ont été validés par rapport à deux variables au moins. Une deuxième validation a été réalisée par inter-comparaison des résultats des trois modèles. Le modèle EARTH (Choisnel, 1985) paraît cependant mieux adapté à une étude régionale à cause de sa souplesse et de sa faible exigence en paramètres.

La spatialisation des paramètres de type sol a été réalisée à partir de la carte pédologique de la zone d'étude située entre Colmar et Strasbourg (1700 km²). La cartographie des paramètres de type plante a été déduite de la carte d'occupation du sol obtenue par image satellitaire. Le modèle a été modifié de manière à effectuer le calcul du bilan hydrique en chaque nœud d'un maillage régulier sur la zone d'étude. La procédure permet de calculer, en chaque nœud de la grille (selon un pas d'espace variable), le drainage profond (recharge nette), l'ETR, les températures à différentes profondeurs du sol, ainsi que tous les termes du bilan d'énergie. L'analyse des résultats de simulation spatialisés à deux échelles 100 m et 1 km a permis la quantification de la recharge de la nappe et la mise en évidence de la forte variabilité de cette dernière sur la zone d'étude.

Mots clés : sol-plante-atmosphère, modèle, bilan hydrique, carte pédologique, carte d'occupation du sol, spatialisation, recharge de la nappe.

Abstract

Spatialized modeling of water flow in the Soil-Vegetation-Atmosphere system. Application to the ground water recharge estimation of the Alsace plain

The importance of the groundwater of the Alsace plain and the important role which it represents from an economic and environmental standpoint, caused the development of several research programs concerning protection of the water resource against the pollution of agrarian or industrial origin. In this context, it was thus interesting to undertake a regional study to concretely evaluate the refill of the groundwater by the rains and to appreciate the effect of the conditions of surface on the transfer of meteoric water towards the aquifer. In this context, it appeared essential to conduct scientific work making it possible to tackle these questions on the basis of better knowledge of the hydrous functioning of the system Soil-Vegetation-Atmosphere. We develop an approach based on an in situ experimentation, followed by a spatialized modeling, applied to a zone between Strasbourg and Colmar (1700 km²). The step used is more conceptual than those which were followed hitherto for the study of the refill of the groundwater by precipitation.

The three models were validated to respect to two variables at least. A second validation was carried out by inter-comparison of the results of three models.

A cartography of the physical soil characteristics (texture classification, useful reserve in particular) was carried out by digitalization of the maps of the arable lands. The cartography of the farming occupation was carried out starting from image processing of American satellite LANDSAT-TM with high resolution. The model used for spatialization was modified so as to carry out the water balance calculation in each node of a regular grid on the entire studies zone. The procedure makes it possible to calculate, in each node of the grid (according to a variable unit of space), the subsoil drain (clean refill), as well as the AET. It provides moreover all the terms of the assessment of energy as well as the temperature in the soil at depths of 0.1 m, 0.5 m and 1 m of deep. Analysis of simulating results with 100m and 1km meshes resolution have allowed quantification of groundwater recharge and displayed a strong spatial variability of thesis on the studies area.

Key-words : Sol-Vegetation-atmosphere, water balance modeling, pedological map, land cover, map spatialisation, groundwater recharge net.