

I. PRINCIPE ET CONCEPTION DU MODELE COUPLE G.GIRARD

Le modèle couplé a été conçu avec le souci de parvenir à une représentation aussi phénoménologique que possible d'un système hydrologique. Ce voeu n'a pu cependant être réalisé qu'à des degrés divers. Certains mécanismes élémentaires du cycle de l'eau dont la connaissance est éprouvée de longue date, tels que ceux régissant les écoulements souterrains en milieu poreux, apparaîtront ainsi comme très détaillés. D'autres plus complexes et moins bien connus seront traités globalement par des modèles de type paramétrique ; ce sera par exemple le cas des mécanismes d'infiltration dans le sol.

La caractéristique essentielle de la méthode proposée est de chercher à décomposer la chaîne des mécanismes constituant le cycle de l'eau en étapes qui seront considérées, aussi longtemps que cela sera possible, comme indépendantes, et dont les manifestations seront contrôlables séparément. De la sorte seront réunis à la fois les avantages évidents d'une simulation globale d'un système hydrologique et la faculté de vérification de la validité de certains mécanismes internes au système.

Le modèle est articulé en quatre parties principales concernant :

- l'élaboration de la structure.
- le bilan hydrique des précipitations ou production.
- le transfert dans la zone non saturée.
- enfin les transferts conjoints superficiels et souterrains.

1. Définition de la structure du système hydrologique

La représentation des écoulements au moyen du modèle couplé nécessite tout d'abord la définition de la structure du système hydrologique, issue des observations de terrain.

1.1. Le domaine d'étude

A l'échelle régionale le domaine d'étude est la réunion d'un domaine superficiel englobant un ou plusieurs bassins versants complets ou non, et d'un domaine souterrain rassemblant des formations géologiques aquifères ayant éventuellement des relations entre elles ainsi qu'avec le domaine de surface. Un tel système est évidemment ouvert et les échanges avec le milieu extérieur sont de différentes catégories :

- échanges avec l'atmosphère.
- sorties par les exutoires superficiels.
- apports latéraux en limite du domaine de surface.
- apports latéraux en limite du domaine souterrain.

1.2. Discrétisation spatiale du domaine

La définition de la structure est fondée sur la discrétisation spatiale du domaine en éléments auxquels sont rattachées les caractéristiques physiques aussi bien superficielles que souterraines du milieu. Le mode de discrétisation adopté est une généralisation de la schématisation multicouche utilisant des mailles carrées emboîtées, devenue classique en hydrogéologie (Armisen et al., 1975, Ledoux, 1975, 1978).

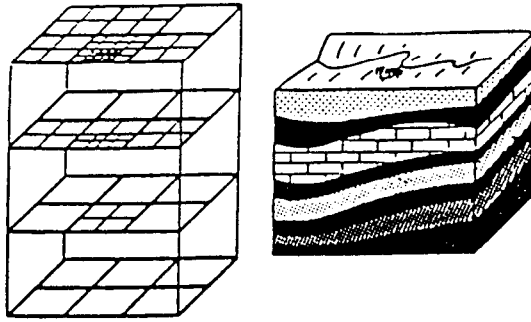


Figure 1 : Principe de la schématisation multicouche

Le modèle couplé distingue, d'une part une couche supérieure dite de surface où s'effectue le partage de l'eau disponible en infiltration et ruissellement, ainsi que le transfert superficiel ; d'autre part un nombre variable de couches profondes, sièges d'écoulements souterrains, éventuellement connectées hydrauliquement entre elles, figurant la succession verticale des niveaux aquifères telle qu'on peut la rencontrer dans les bassins sédimentaires constituant le cadre habituel des études de ressources en eau.

1.3. Définition du réseau de drainage superficiel

Selon la discrétisation de l'espace évoquée précédemment, le réseau de drainage de surface revêt la forme d'une ou plusieurs arborescences qui sont définies sans ambiguïté par la connaissance pour chaque maille de la surface d'une direction unique de vidange. Ce réseau de drainage est ensuite classé en deux catégories selon qu'il s'agit d'une maille appartenant au réseau hydrographique principal ou bien à la zone de ruissellement pur (figure 2).

- Réseau hydrographique principal : les mailles appartenant au réseau hydrographique principal sur lesquelles ont lieu les échanges à double sens avec le domaine souterrain sont appelées "mailles rivières". A chaque exutoire de ce réseau se trouve correspondre un bassin versant du domaine superficiel représenté par un arbre d'écoulement unique, sur lesquels seront effectués ultérieurement les transferts de l'eau en rivière.

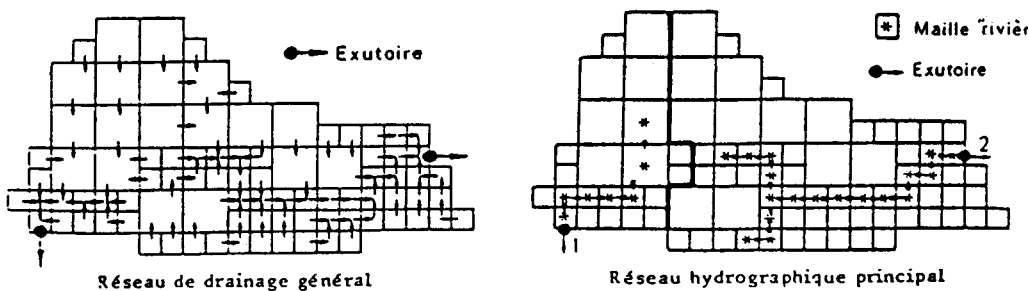


Figure 2 : Structure du réseau de drainage superficiel

- Réseau d'écoulement de la zone de ruissellement pur : les mailles du domaine superficiel non sélectionnées comme mailles-rivières se classent en deux catégories :
 - . celles qui appartiennent à une portion du réseau de drainage général dont l'exutoire ne fait pas partie du réseau hydrographique principal. Elles forment alors un ou plusieurs bassins dont les écoulements ne seront pas complètement simulés, le modèle se limitant au calcul de l'infiltration en vue de l'alimentation des nappes sous-jacentes.
 - . celles qui font partie du réseau de drainage général dont l'exutoire est une maille-rivière. Ces mailles constituent dans ce cas un "sous-bassin de calcul" dont l'exutoire est une maille-rivière sur lequel seront effectués les calculs de l'infiltration et du transfert jusqu'à la rivière indépendamment des écoulements souterrains.

Cette subdivision en deux types de mode de drainage est motivée par un souci d'allègement des calculs, en n'utilisant les possibilités complètes du modèle qu'aux endroits où cela est réellement nécessaire. Différentes configurations sont possibles, notamment les configurations extrêmes. Un problème où l'on ne s'intéresserait qu'à des écoulements souterrains déconnectés du réseau hydrographique ne comporterait ainsi pas de mailles rivières, seul le calcul de l'infiltration étant requis. A l'opposé, un échange nappe-rivière sur l'étendue du domaine de surface est possible en affectant l'ensemble du réseau de drainage à des mailles-rivières.

1.4. Définition des caractéristiques physiographiques

Les données physiographiques introduites sur chaque maille de la surface concernent :

- l'altitude minimale du réseau de drainage, utilisée ultérieurement pour le calcul des temps de transfert ;
- la nature des sols présents sur chaque maille, exprimée en fraction de superficie occupée par chaque catégorie de sol ; la distinction en catégories reposant sur la manière dont doit être effectué le bilan hydrique.

2. Calcul du bilan hydrique

Le calcul du bilan hydrique, effectué au moyen des fonctions production, a pour objectif la répartition de la lame d'eau disponible au sol entre le ruissellement, l'évaporation, l'infiltration et la quantité stockée dans le sol.

Ce calcul est mené suivant le pas de temps des données des précipitations, pour chacun des postes pluviométriques définissant une zone météorologique et pour chacune des catégories de sol introduites avec la structure.

2.1. Les zones météorologiques

Selon les disponibilités en données de précipitation, chaque maille de la surface est affectée à un poste pluviométrique définissant ainsi un certain nombre de zones météorologiques caractérisées par une lame d'eau disponible au sol à chaque pas de temps. Selon l'étendue du domaine, il peut être également nécessaire de moduler la définition de ces zones en fonction de la variabilité de l'évapotranspiration potentielle.

2.2. Les fonctions production

Chaque fonction production, correspondant à une catégorie de sol, fonctionne selon un mécanisme adapté par l'utilisateur à la nature du problème. Il est fait appel à des modèles paramétriques simples appartenant à la famille des modèles à réservoirs, car les mécanismes physiques régissant le bilan hydrique sont tellement complexes que leur prise en compte à l'échelle du domaine d'étude par un modèle phénoménologique conduirait à une trop grande lourdeur d'application. Bien que paramétrique, il convient de noter que l'approche globale par fonction production est une approche robuste en ce sens que, tout au moins lorsqu'il s'agit de conditions d'application analogues, la transposition pure et simple des valeurs des paramètres d'une application à une autre conduit à une première évaluation satisfaisante du bilan hydrique.

La figure 3 illustre le principe de fonctionnement d'une fonction production de type standard proposée par le modèle couplé.

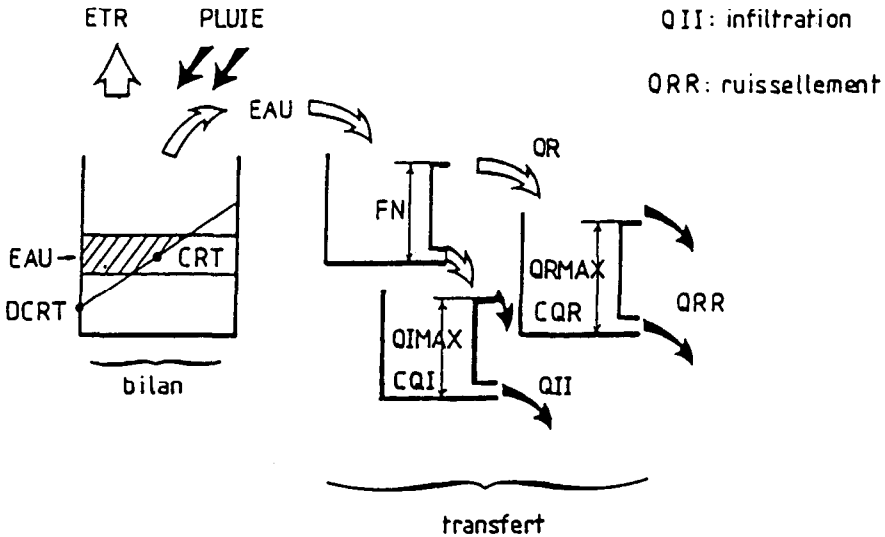


Figure 3 : Principe de fonctionnement d'une fonction-production

Le bilan hydrique est effectué dans le réservoir de bilan à chaque pas de temps en fonction de la lame d'eau précipitée P , de l'évapotranspiration potentielle ETP et de l'état du stock en eau R du réservoir. La quantité EAU disponible pour l'écoulement est alors déterminée par deux paramètres $DCRT$ et CRT représentant les niveaux minimal et moyen du réservoir sol. Le premier réservoir de transfert a ensuite pour tâche de répartir l'eau disponible en une lame ruisselée QR et une lame infiltrée QI en fonction d'un seuil d'infiltration FN . Deux autres réservoirs de transfert apportent éventuellement un retard à ces quantités, selon un mécanisme de vidange exponentielle avant de les introduire dans le système hydrologique.

3. Le transfert dans la zone non saturée

La quantité d'eau mise en circulation dans le système ayant été déterminée au moyen des fonctions production traduisant le comportement du sol superficiel, la zone non saturée profonde est susceptible de moduler l'infiltration, selon la profondeur de la première nappe souterraine et selon les caractéristiques hydrodynamiques du milieu qui la constitue.

Etant donné qu'il est difficile sinon impossible, de recueillir des informations à l'échelle régionale sur la répartition verticale de la perméabilité de la zone non saturée, il est proposé d'opérer une modélisation de nature paramétrique mise en oeuvre sur des zones homogènes définies à partir des mailles de la surface.

Des études portant sur la relation à l'échelle régionale (Besbes, 1978) entre l'infiltration dans le sol et l'alimentation des nappes ont montré que la fonction de transfert dans la zone non saturée pouvait être assimilée au modèle à réservoirs en cascade de Nash (figure 4).

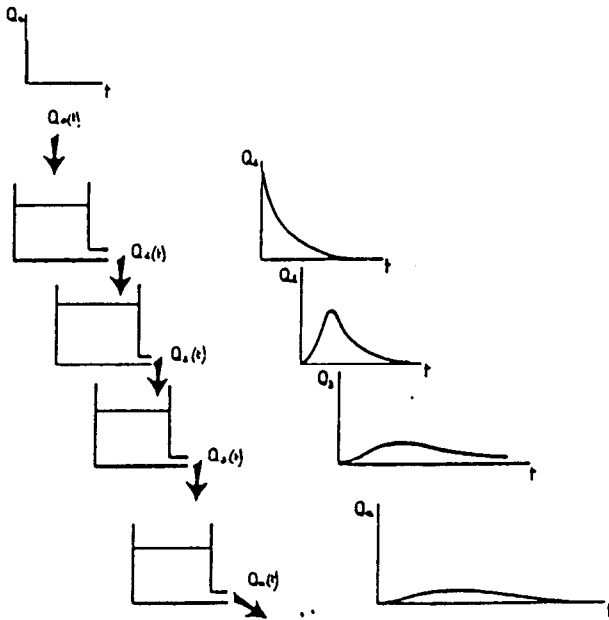


Figure 4 : Principe de modélisation du transfert dans la zone non saturée

Un tel modèle dépend de deux paramètres : le nombre N de réservoirs reflétant l'épaisseur de la zone non saturée, supposée décomposée en N couches horizontales homogènes, la constante de temps de vidange des réservoirs caractérisant la vitesse de percolation verticale de l'eau. Bien entendu ces paramètres doivent être précisés par calibrage du modèle, notamment au moyen des historiques piézométriques.

4. Les transferts conjoints superficiels et souterrains

4.1. Le transfert souterrain

Ce transfert est basé sur l'intégration numérique de l'équation de diffusivité régissant les écoulements en milieu poreux. La schématisation multicouche adoptée distingue des niveaux dits aquifères, subhorizontaux, sièges d'écoulements en nappe, séparés par des niveaux dits semi-perméables où les circulations sont faibles mais toutefois capables d'assurer des transferts notables entre les aquifères à l'échelle régionale. Le modèle de transfert souterrain considère que les écoulements sont bidimensionnels dans les aquifères et monodimensionnels subverticaux dans les semi-perméables.

La traduction pour chaque maille du principe de conservation de la masse d'eau au cours du mouvement régi par la loi de Darcy en fonction de la charge moyenne sur chaque maille et des valeurs discrétisées des paramètres hydrodynamiques conduit à un système d'équations différentielles du premier ordre par rapport au temps que l'on résout par une méthode itérative.

4.2. Le transfert sur les zones de ruissellement pur

L'eau disponible pour le ruissellement à l'issue des fonctions production est acheminée à l'exutoire de chaque sous-bassin de calcul. c'est-à-dire jusqu'au réseau hydrographique principal selon un algorithme basé sur la notion d'isochronisme (figure 5).

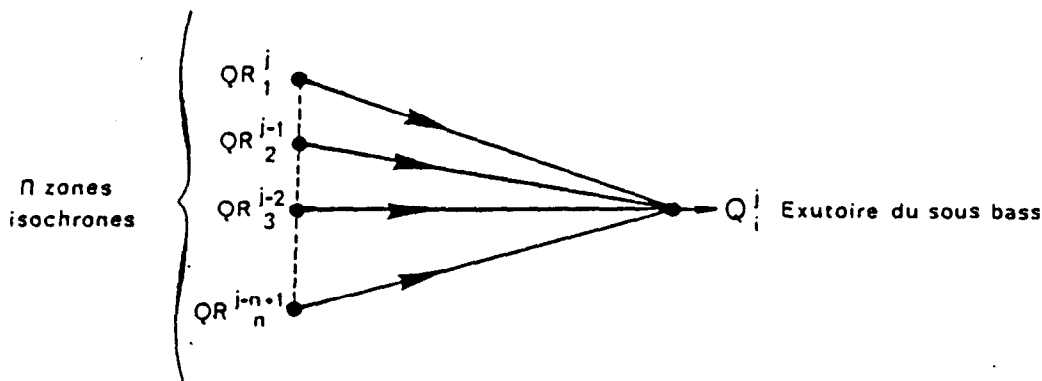


Figure 5 : Schéma du transfert sur les zones de ruissellement pur

Le volume ruisselé Q_i^j au pas de temps j à l'exutoire du sous-bassin de calcul i est obtenu par la formule :

$$Q_i^j = \sum_{k=1}^n QR_k^{j-k+1}$$

où QR_k^{j-k+1} représente le volume disponible pour le ruissellement au pas de temps $j-k+1$ sur la zone isochrone de numéro k , n étant le nombre total de ces zones relativement au sous-bassin de calcul considéré.

Remarquons qu'à ce niveau le transfert de l'eau est effectué globalement jusqu'à la maille rivière exutoire du sous-bassin de calcul, ce qui implique que le débit ne peut être calculé qu'à cet exutoire, à l'exclusion de tout autre point intermédiaire. De plus, le calcul considère que les écoulements en provenance des zones isochrones s'effectuent en parallèle, c'est-à-dire sans possibilité de laminage d'une crue au passage d'une zone à l'autre. Enfin l'eau ruisselant en un point du sous-bassin ne peut s'infiltrer en aval le long de son trajet vers l'exutoire. Ce cas a déjà été pris en compte au niveau des fonctions production et sera repris lors de l'écoulement en rivière.

4.3. Le transfert dans le réseau hydrographique principal

Le transfert en rivière achemine l'eau produite par ruissellement à l'exutoire des sous-bassins de calcul vers les exutoires des différents bassins en tenant compte des échanges nappes-rivières. L'algorithme de transfert considère le réseau hydrographique principal comme une arborescence de réservoirs ou biefs se vidant les uns dans les autres de l'amont vers l'aval suivant une loi de tarissement exponentielle.

Les biefs sont établis par regroupement des mailles-rivières offrant à l'eau la même durée de trajet jusqu'à l'exutoire, une fois effectué le choix d'un pas de temps pour le calcul, qui peut être différent du pas de temps des précipitations (figure 6). Le transfert porte sur le stock en eau total d'un bief et non sur le stock individuel de chaque maille-rivière, il en résulte, qu'une fois le transfert réalisé, le volume dans chaque bief doit être à nouveau réparti dans les mailles le constituant en vue de l'évaluation des échanges nappes-rivières.

A l'opposé du cas de ruissellement pur, le débit peut être simulé en n'importe quel point du réseau hydrographique principal, permettant par exemple la comparaison avec les données de différentes stations hydrométriques.

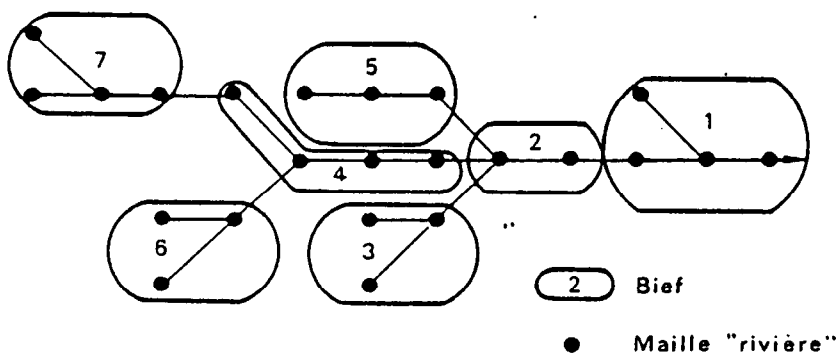


Figure 6 : Principe de constitution des "biefs" sur le réseau hydrographique principal

4.4. La relation nappes-rivières

Cette relation règle au niveau du réseau hydrographique principal la liaison entre le transfert souterrain et le transfert superficiel. Le couplage est effectué à chaque pas de temps entre une maille rivière et les mailles des couches souterraines qui lui correspondent verticalement. Selon l'état hydraulique du système, deux situations sont possibles (figure 7).

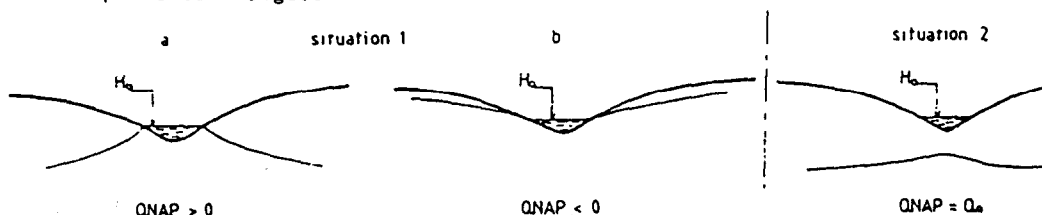


Figure 7 : Principe de la relation nappe-rivière

- Situation 1 : la rivière et la nappe sont connectées hydrauliquement. La rivière impose son niveau à la nappe moyennant une certaine perte de charge à travers son lit. Le sens de circulation de l'eau peut éventuellement varier avec le temps.
- Situation 2 : la rivière et la nappe sont déconnectées par la présence d'une zone non saturée. Le modèle considère dans ce cas que le transfert s'effectue dans le sens rivière-nappe avec une valeur donnée du débit.

Remarquons que les variations annuelles de régime hydraulique peuvent provoquer des changements de situation de la relation nappe-rivière ; il est de plus nécessaire de tenir compte pour le calcul de l'infiltration de la quantité d'eau disponible en rivière. La combinaison de ces différents mécanismes aboutit à une formulation non linéaire de cette relation.

5. Architecture du modèle

Les programmes ont été conçus de manière modulaire de manière permettre un traitement découplé des différents transferts aussi longtemps que cela est possible, ainsi qu'une adaptation aisée du modèle au problème traité.

Un premier programme (GEOCOU) concerne la définition de la structure du système qui assurera la description des caractéristiques physiques des aquifères et des caractéristiques physiographiques des bassins versants.

Un second programme (MODSUR) se charge d'établir les bilans hydriques à partir des caractéristiques de la structure et conduit à une première évaluation de l'écoulement permettant un précalibrage du bilan hydrologique global.

Enfin le dernier programme (MODCOU) réalise la simulation conjointe des transferts superficiels et souterrains, et calcule les débits aux stations hydrométriques et exutoires des bassins ainsi que les variations de l'état piézométrique des nappes.

LES PROBLEMATIQUES D'UTILISATION DE CES MODELES

1- EXEMPLE

Lors du calage du modèle couplé sur le bassin versant de la JUINE-ESSONNE, il s'est posé le problème de la reproduction des débits écoulés aux stations hydrologiques situées à l'aval du bassin au cours de l'année 1976 au moins décennale sèche.

Les prélèvements en rivière ne pouvaient dépasser 500 l/s à cette période et l'on constatait une perte de l'ordre de $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ à l'aval du bassin par rapport aux restitutions normales des nappes du bassin fournies par le modèle souterrain. Cette perte est expliquée par une reprise par transpiration de la végétation (végétation développée et localisée dans les larges plaines alluviales à très faibles pentes) à partir des eaux en provenance des nappes des bassins versants situés en amont. Grâce à l'introduction de ce concept de reprise au niveau production facilitée par le fait que ces plaines alluviales avaient été incluses au moment de la discrétisation de la physiographie, les résultats ont été immédiats sans aucun calage.

Cet exemple montre non seulement la flexibilité de ce modèle modulaire mais aussi sa robustesse. Cette application a mis en évidence une articulation des systèmes individuels entre eux au niveau de la production en eau du système hydrologique complet. Elle pose un des nombreux problèmes de transfert d'échelles en hydrologique lié à l'articulation des systèmes entre eux et de l'interaction entre éléments voisins mais parfois éloignés.

2- EXEMPLE

A la fin du calage de ce même modèle appliqué aux bassins versants de la Meuse et de la Moselle, il est apparu que si les débits au cours de l'année 1976 au moins décennale sèche étaient bien représentés, ceux au cours de l'année suivante 1977 au moins décennale humide étaient très excédentaires lors des premières crues par rapport aux débits observés.

L'explication est à rechercher au niveau de la fonction production standard du modèle que je vous ai présentée et qui ne peut prendre en

compte dans son état actuel soit des prélèvements par la végétation lors des grandes périodes sèches et de l'épuisement de certaines réserves d'eau mobilisées qu'occasionnellement dont il faudrait tenir compte dans la conception du modèle production.

Cet exemple montre le poids de l'hétérogénéité du milieu et de sa difficile prise en compte.

AUTRE MODELE A DISCRETISATION

Un modèle dérivé est celui spécifique à la modélisation des écoulements de surface sur des bassins hydrologiques équipés de réservoirs. Il a été appliqué au Nord-Est du Brésil sur le bassin ACARAU de 11000 km² et au Sud du Brésil sur le bassin du Rio PARAUBA do SUL équipé de 4 retenues de plus de 1 milliard de m³.

Le modèle utilisé au Ministère des Mines et Energie du Brésil à BRASILIA est appliqué par l'équipe du DNAE sur le Rio DOCE et un autre bassin du Sud, le Rio URUGUAY.

LES DIVERSES APPLICATIONS DU MODELE COUPLE A DISCRETISATION SPATIALE

- Bassin du CARAMY (BRIGNOLES, Sud-Est de la France)

Objectifs : Perturbation des étiages par suite des arrêts des exhaures des mines de bauxites.

Alimentation en eau de TOULON

- Bassin de la LYS (LILLE, Nord de la France)

Objectifs : Accroissement des débits prélevés en étiage pour alimenter en eau la ville de LILLE par des pompages dans la nappe qui induisent une réduction des débits de la LYS.

- Bassin de la JUINE-ESSONNE (Sud de PARIS)

Objectifs : Influence des captages à 650 l/s dans les nappes pour alimenter PARIS sur le débit des rivières et la piézométrie des nappes compte tenu d'un accroissement des prélèvements locaux et de l'accroissement des irrigations.

- Bassin de la MEUSE et de la MOSELLE

Objectifs : Etude de la transposabilité du modèle calé aux sous-bassins et aux bassins versants voisins.

Etude de la sensibilité des paramètres et des entrées du modèle.

Contribution à l'étude de ces bassins.

- Bassins de QUITO (Equateur)

Objectifs : Influence de l'accroissement de prélèvements pour QUITO sur la nappe et influence de l'urbanisation sur la réduction de l'alimentation à la nappe.

- Bassins de l'ADOUR, la LEYRE et la GELISE (Sud-Ouest de la France)

Objectifs : Estimation de l'évapotranspiration réelle d'une maille de $100 \times 100 \text{ km}^2$.

Bilan hydrologique à grand pas d'espace.

Etude incluse dans le programme HAPEX-MOBILHY et faite avec l'EERM de TOULOUSE.

BIBLIOGRAPHIE

- ANDRE P., COMBES P., GIRARD G. : Etude des modalités d'exploitation des eaux souterraines du bassin JUINE-ESSONNE (région parisienne) à l'aide d'un modèle couplé.
Hydrogéologie-géologie de l'ingénieur : 4, 1984, pp. 329-342, 17 fig.
- GIRARD G., LEDOUX E., VILLENEUVE J.P. : Le modèle couplé. Simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un système hydrologique.
Cahier ORSTOM, série Hydrol., vol. XVIII, n° 4, 1981.
- GIRARD G. : Modélisation des écoulements de surface sur des bassins hydrologiques équipés de réservoirs. Modèle MODLAC.
Cahier ORSTOM, série Hydrol., vol. XIX, n° 2, 1982.
- GILLE E. : Contribution à l'étude hydrologique des bassins de la Meuse et de la Moselle : problématique de l'utilisation d'un modèle couplé à discrétisation spatiale.
Thèse de 3e cycle, 5 Juillet 1985, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris et Université Pierre et Marie Curie, 213 p.
- GILLE E., GIRARD G., LEDOUX E., ZUMSTEIN F. : Problématique de la transposition des modèles à discrétisation spatiale de simulation conjointe des écoulements superficiels et souterrains sur des bassins versants voisins.
Hydrogéologie-Géologie de l'Ingénieur : 4, 1985 (à paraître).