

# La démarche de modélisation régionale des écoulements d'eau, de la production et du transfert d'azote sur le bassin de la Seine, structure du modèle d'écoulement

**Eric Gomez** (CIG, École des Mines de Paris)  
**Emmanuel Ledoux** (CIG, École des Mines de Paris)  
**Bruno Mary** (INRA, Agronomie Laon)

L'objectif de l'étude est double : simuler, dans un premier temps, de manière couplée, les débits dans les cours d'eau et les écoulements dans les aquifères puis, dans un second temps, les transferts des nitrates dans le système hydrologique, depuis les zones d'épandage jusqu'aux exutoires en passant par les différents réservoirs souterrains.

Le point de départ de cette tâche de modélisation régionale est la mise en œuvre du modèle hydrologique MODCOU. Dans cette note, nous présenterons, en particulier, les travaux concernant l'élaboration de la structure du modèle.

## 1 Présentation des outils

Deux outils de simulation existants sont destinés à être associés au sein du modèle régional, le modèle hydrologique et hydrogéologique à discrétisation spatiale MODCOU disponible à l'École des Mines de Paris et le modèle agronomique STICS mis au point à l'INRA. Ces codes de calcul ont déjà servi séparément à maintes reprises et devront être adaptés et perfectionnés pour permettre leur couplage.

### 1.1 Le Modèle Hydrologique Couplé MODCOU

Il a pour objectif de simuler les écoulements de surface, et les écoulements souterrains, en aquifère multicouche (Ledoux, 1980; Ledoux et al., 1984). On utilise pour cela la méthode des différences finies mise en œuvre sur des mailles carrées emboîtées.

La caractéristique essentielle de la méthode de modélisation est de décomposer le cycle de l'eau en étapes qui seront considérées, aussi longtemps que possible, comme indépendantes, et dont les manifestations seront contrôlables séparément. Ainsi, tout en disposant d'une modélisation qui prend en compte le domaine de surface et le domaine souterrain, on peut vérifier la validité des mécanismes internes. Le modèle est ainsi articulé en quatre parties principales concernant :

*L'élaboration de la structure du système hydrologique – programme GEOCOU :*

- discrétisation spatiale des domaines souterrain et de surface,
- définition de l'arbre d'écoulement du domaine de surface,
- distinction entre zones de ruissellement pur et zones figurant le réseau hydrographique principal,
- attribution des caractéristiques physiographiques à chaque élément du domaine de surface.

*Le bilan hydrique des précipitations – programme MODSUR :*

Le calcul du bilan hydrique a pour objectif la répartition de la lame d'eau au sol entre le ruissellement, l'évapotranspiration, l'infiltration et la quantité stockée dans le sol. Il est basé sur le calcul des fonctions de production fonctionnant sur le principe des modèles à réservoirs.

*Le transfert dans la zone non-saturée – programme NONSAT :*

Ce programme assure le transfert vers le milieu souterrain de l'infiltration calculée par MODSUR, au moyen d'une succession de réservoirs en cascade apparentés à un modèle de Nash.

*Les transferts conjoints superficiels et souterrains - programme MODCOU :*

Ce programme simule le devenir de l'eau disponible, à travers le domaine de surface et le domaine souterrain, en tenant compte de leurs interactions, au niveau des mailles rivières, définie dans la fonction d'échange surface-souterrain.

## **1.2 Le modèle agronomique STICS**

STICS (Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard) est destiné à simuler l'évolution de l'eau, du carbone et de l'azote dans le système sol-plante sur une ou plusieurs années successivement (Brisson et al., 1998). Ce modèle agronomique fonctionne au pas de temps journalier. La limite supérieure du système est l'atmosphère, caractérisée par plusieurs variables climatiques (radiation solaire, température minimum et maximum, précipitation, évapotranspiration potentielle). La limite inférieure correspond à la profondeur maximale accessible au système racinaire, fonction du type de sol et de la nature de la plante cultivée. La culture est caractérisée par sa surface d'interception de la lumière (indice de surface foliaire), sa biomasse (stock de carbone), sa capacité de prélèvement d'azote (stock d'azote).

STICS permet de calculer des grandeurs agronomiques (biomasse végétale, rendement en produit récolté, teneur en protéines des grains, bilan azoté de la culture, ...) et des grandeurs environnementales (flux d'eau et de nitrate sortant de la zone racinaire). Il a été conçu et mis au point avec ce double objectif (agronomique et environnemental). C'est un modèle générique, conçu pour pouvoir être transposé rapidement aux principales espèces cultivées. A ce jour, il est paramétrisé et validé pour les céréales à paille (blé d'hiver, escourgeon, orge, blé dur) et le maïs.

L'extension à d'autres cultures d'intérêt agronomique majeur (pois protéagineux, betterave à sucre, tournesol, colza, prairies) ainsi qu'aux cultures intermédiaires (moutarde, radis, graminées) est soit en cours de mise au point soit prévu en 1999. L'effet des apports d'amendements organiques de nature diverse (fumiers, lisiers, composts, ...) sur le bilan humique et la minéralisation d'azote par les sols est déjà pris en compte dans la nouvelle version 4.0 du logiciel, ainsi que le processus de volatilisation d'ammoniac par le sol. La paramétrisation de ces processus reste cependant à compléter. Enfin la variabilité du processus de dénitrification dans les sols n'est pas simulée dans la version actuelle.

STICS est articulé en sept modules : développement, croissance aérienne, composantes du rendement, croissance racinaire, bilan hydrique, environnement thermique de la culture, bilan azoté. Le bilan azoté se décompose lui-même en 4 sous-modules: absorption de nitrate par le système racinaire, décomposition des matières organiques, minéralisation et humification, transfert de nitrate dans le profil de sol.

- Le développement de la culture est simulé par un maximum de 7 stades phénologiques, qui sont à adapter aux différentes espèces végétales, et même aux variétés considérées. Le modèle peut simuler des modes de croissance déterminé (ex: céréales) ou indéterminé (ex: tomate). Chaque stade est obtenu après un intervalle de temps qui peut s'exprimer soit en unités thermiques (degrés-jours), photothermiques ou photothermiques avec des besoins de vernalisation.

- La croissance aérienne potentielle est pilotée par la mise en place des capteurs aériens, caractérisé par l'indice foliaire de la culture, qui détermine l'efficacité d'interception de la lumière. L'efficacité de conversion de cette énergie en biomasse dépend de la température et du stade phénologique. La croissance aérienne réelle peut être restreinte par un stress hydrique ou une carence azotée de la culture.

- Les composantes du rendement simulées par le modèle sont, pour les céréales, le nombre de grains et le poids de grain. Le nombre maximal de grains est atteint à la fin du stade début de remplissage du grain. La matière sèche et l'azote accumulés dans les grains sont simulés pendant toute la période de remplissage du grain en considérant un accroissement journalier fixe de l'indice de récolte.

- La croissance racinaire est caractérisée par la densité d'enracinement par couche de sol et une profondeur maximale d'enracinement. L'évolution de ces deux paramètres dépend des conditions hydriques et thermiques qui sont simulées dans le sol.

- Le bilan hydrique dans le sol est le bilan entre la transpiration réelle de la culture, l'évaporation du sol et la pluviométrie. La transpiration réelle dépend de la transpiration maximale possible de la culture à un stade phénologique donné et du stress hydrique éventuel (stress stomatique ou stress de turgescence). L'évaporation du sol est simulée en 2 phases: une phase d'évaporation potentielle puis une phase avec réduction de l'évaporation. En régime de drainage, le transfert d'eau dans le sol est décrit selon un modèle réservoir, chaque réservoir représentant une couche de 1 cm d'épaisseur.

- L'environnement thermique de la culture est caractérisé par la température d'ambiance de la culture et la température du sol. Ces deux variables sont calculées à partir de la température classiquement mesurée dans les stations météo qui est celle de l'air à 2 m (variable d'entrée) et des caractéristiques du sol (albédo) et de la plante (intensité du stress hydrique). Ces variables agissent en retour sur la croissance de la culture et la minéralisation d'azote par le sol.

- Le bilan azoté dans le sol est déterminé par les entrées et les sorties d'azote dans le pool d'azote minéral. Les entrées sont constituées des apports atmosphériques (pluies et irrigations), des engrais minéraux, de la minéralisation d'azote. Les sorties sont l'absorption racinaire du nitrate, le lessivage du nitrate, les pertes gazeuses (volatilisation et dénitrification), l'organisation d'azote par voie microbienne. La minéralisation d'azote a trois origines distinctes : l'humus, les résidus de récolte de la culture précédente, les amendements organiques récents. L'absorption d'azote est déterminée soit par la disponibilité du nitrate dans le sol, soit par la capacité propre d'absorption de la plante, elle-même liée à sa vitesse de croissance. Le lessivage du nitrate est simulé par un modèle de type "mixing cells" (Mary et al., 1999). La minéralisation d'azote est pilotée par la vitesse de décomposition et le rapport C/N des différentes matières organiques. L'insuffisance d'azote minéral peut cependant avoir un effet de rétroaction négatif sur la vitesse de décomposition et la minéralisation nette d'azote.

En résumé, STICS est un modèle dynamique fonctionnel de complexité intermédiaire entre des modèles mécanistes de la plante ou du sol et des modèles statiques simplifiés de bilan d'azote. Les premiers sont pour l'instant essentiellement des modèles à vocation recherche, beaucoup plus lourds à mettre en oeuvre et à paramétrer. Les seconds peuvent être suffisants pour expliquer les grandes tendances de l'évolution observée depuis une cinquantaine d'années qui correspondent à une très forte variation du bilan azoté en agriculture. Par contre, ils sont probablement insuffisants pour simuler l'impact que pourraient avoir des changements plus modérés de bilan azoté et plus qualitatifs, tels que ceux qu'on peut imaginer dans des scénarios d'agriculture durable. STICS nous paraît constituer un outil mieux approprié pour faire une simulation réaliste de l'impact de ces scénarios.

## **2 Elaboration de la structure du modèle hydrologique**

### **2.1 Extraction du réseau de drainage**

Le modèle numérique d'altitude (M.N.T. : représentation informatique de la topographie) dont nous disposons couvre la zone 335000-981000WE et 2115000-2666000SN en coordonnées Lambert zone 2, sous forme matricielle, avec un pas de 1km. Pour l'ensemble des données, l'erreur quadratique moyenne des valeurs d'altitude est estimée à 18 mètres. Ce M.N.T. (GTOPO30) est distribué par l'U.S. Geological Survey's EROS Data Center (SIOUX Falls).

A partir du M.N.T., le programme développé par Leblois (1993), permet d'extraire le réseau de drainage de manière automatique. Les informations obtenues sont gérées par le S.I.G. IDRISI. La méthode employée est la suivante :

*Calcul des pentes*

Leblois (1993), propose 4 façons de réaliser le calcul des pentes. Ces procédures se révèlent plus ou moins aptes à représenter la réalité. Ainsi, les conclusions tirées de la pratique d'IDRISI, se rapprochent de celles de Skidmore (1989). Elles montrent que les méthodes, dont les résultats s'approchent le plus de la réalité, s'appuient sur :

- des modèles de régression multi-linéaires.

Les valeurs d'altitudes, prises sur la surface couverte par les 9 mailles centrées sur la maille courante sont estimées par la relation :

$$z = b_0 + b_1x + b_2y + b_3x^2 + b_4y^2 + b_5xy + e$$

Les coefficients  $b_i$  sont ensuite calculés par des méthodes statistiques.

- des modèles en différences finies du 3<sup>ème</sup> ordre :

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{[z_{(i+1, j+1)} + 2z_{(i+1, j)} + z_{(i+1, j-1)}] - [z_{(i-1, j-1)} + 2z_{(i-1, j)} + z_{(i-1, j+1)}]}{8DX}$$

De la même façon,  $\delta z/\delta y$  est calculée par substitution de i, j, DX par j, i, DY.

La pente est calculée par :

$$pente = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2}$$

*Classement des directions obtenues*

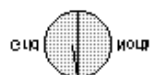
La courbe de niveau se définit par :

$$dz = \frac{\partial z}{\partial x} dx + \frac{\partial z}{\partial y} dy = 0$$

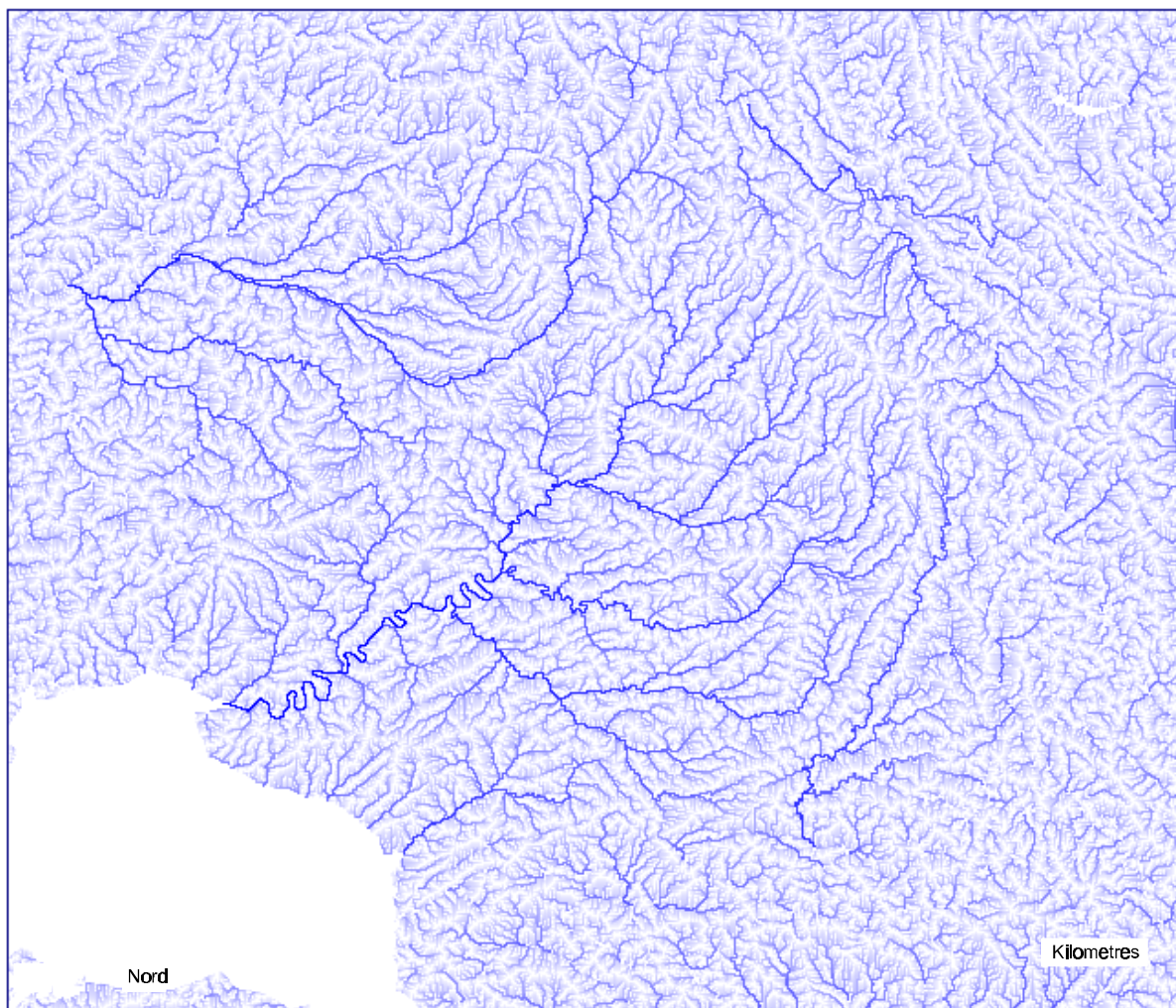
On en déduit l'orientation de la ligne de plus grande pente :

$$a_p = \text{Arctg}\left(-\frac{dx}{dy}\right) = \text{Arctg}\left(\frac{\frac{\partial z}{\partial y}}{\frac{\partial z}{\partial x}}\right)$$

Ainsi, pour chaque maille, un azimut est calculé. IDRISI considère une topologie en 4-connexités, soit 4 directions d'écoulements possibles : Nord (si angle compris entre 0° et 44°, et 315° et 360°), Sud (si angle compris entre 135° et 224°), Ouest (si angle compris entre 225° et 314°), Est (si angle compris entre 45° et 134°). On obtient alors une couche d'information appelée modèle d'écoulement.



100'00  
Kilomètres



**Figure 1.** Représentation des surfaces drainées.

La procédure E-VERIRD.PAS vérifie que chaque maille est correctement drainée par le modèle d'écoulement ainsi obtenu. Elle cartographie les erreurs possibles : mailles à pentes nulles, mailles prises dans une boucle... Ainsi, les problèmes se posent au fond des thalwegs et dans les zones où les pentes sont mal définies. Il est alors possible, par la suite, de corriger le sens d'écoulement en direction de l'aval souhaité.

#### *Calcul des surfaces drainées*

A partir du modèle d'écoulement, les surfaces drainées sont calculées, pour chaque maille, en sommant la surface des mailles amont. Ceci est représenté sur la figure 1 où plus la couleur de la maille est bleue, plus la surface drainée amont est importante. Ainsi, les plus fortes valeurs se trouvent évidemment au niveau du réseau hydrographique. Les corrections éventuelles des directions de drainage se font, à ce moment, en confrontant l'image obtenue, avec une carte topographique.

En plaçant les stations hydrométriques sur le réseau de drainage, on observe parfois une dérive du réseau hydrographique. Ceci s'explique par le fait que le modèle attribue une direction de drainage parmi 4 valeurs discrètes avec une erreur valant au maximum  $\pi/4$ . Ces erreurs risquent de se cumuler le long du réseau de drainage et peuvent induire une « dérive » du drainage (Razianoff, 1992). Ainsi, lorsque le décalage était au moins supérieur à 2 km, nous avons corrigé localement le chevelu en nous efforçant de le faire passer par les stations référencées. C'est un travail coûteux en temps. Sur

l'ensemble du bassin versant, on considère que le réseau de drainage est bien calé en x et en y avec une erreur maximum de 1 kilomètre.

Enfin, une étape essentielle consiste à comparer les surfaces restituées par le calcul ( $S_{\text{hydro}}$ ) aux surfaces ( $S$ ) annoncées par les gestionnaires, considérées comme exactes. Pour cela, on utilise un critère géométrique. On admet que le schéma peut induire une erreur d'une cellule sur le pourtour du bassin versant. L'erreur relative autorisée  $E$  est donc égale au produit de la surface d'un pixel du M.N.T. par le périmètre du bassin. On admet que pour une surface donnée, la figure géométrique qui représente le périmètre minimal, est un disque. Le critère consiste donc à comparer l'erreur de reconstitution ( $S - S_{\text{hydro}}$ ) à l'erreur relative autorisée ( $E$ ) pour un disque de surface équivalente à  $S_{\text{hydro}}$ . Ainsi, parmi les 171 stations retenues drainant une surface de  $250 \text{ km}^2$  au minimum, 2 stations dépassent l'erreur autorisée de 1%.

#### *Seuillage de la surface drainée*

Lorsque le réseau de drainage obtenu est satisfaisant, on peut obtenir plusieurs images du réseau hydrographique. Celui-ci est en effet défini à partir du réseau de drainage, et tronqué en amont de façon à ce que tous les points à la source d'une rivière drainent une certaine surface, appelée valeur de seuillage. Ceci est basé sur l'idée qu'il existe une valeur de seuillage optimale, qui permet de retrouver le réseau hydrographique naturel, dans un contexte géologique et climatique donné. En fixant le seuillage de la surface drainée à  $250 \text{ km}^2$ , on obtient le réseau hydrographique principal (figure 2).

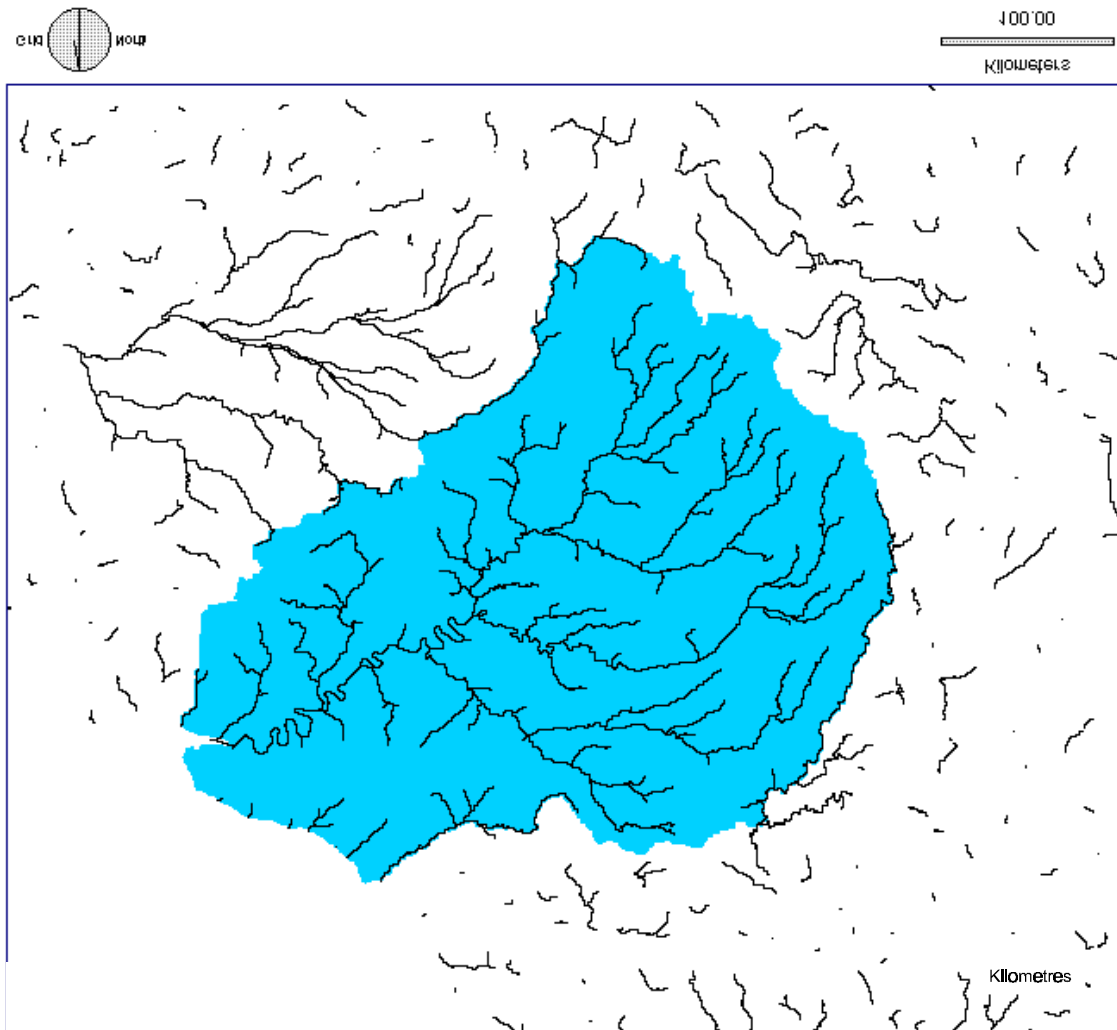
#### *Délimitation du bassin versant*

Cette couche d'information est obtenue grâce à la procédure qui détermine le bassin versant d'un point particulier, en l'occurrence l'exutoire de la Seine.

Cependant, les aquifères jouent un rôle important dans le transport des nitrates et les zones d'alimentation de ceux-ci se situent parfois à l'extérieur du bassin versant hydrologique. Par conséquent, pour prendre en compte l'effet des aquifères, il est nécessaire d'étendre le domaine d'étude jusqu'aux limites à charges imposées (cours d'eau) ou jusqu'aux limites à flux nul (crêtes) (figure 2). Ce sont les conditions aux limites du système souterrain.

#### *Découpage du bassin versant en sous-bassins versants*

Ce découpage en sous-bassins est obtenu à partir de la numérotation, selon Strahler, du réseau hydrographique : si 2 mailles sont drainées par le même tronçon de rivière d'ordre de Strahler homogène, alors elles appartiennent au même sous-bassin. Ce découpage a été fait sur la base du réseau hydrographique seuillé à  $250 \text{ km}^2$ . Ainsi, on dénombre 155 sous-bassins ayant une superficie supérieure à  $250 \text{ km}^2$ .



**Figure 2.** Réseau hydrographique (seuillage=250 km<sup>2</sup>) et conditions aux limites du système.

## 2.2 Discrétisation spatiale

### *Constitution des fichiers d'entrée pour GEOCOU*

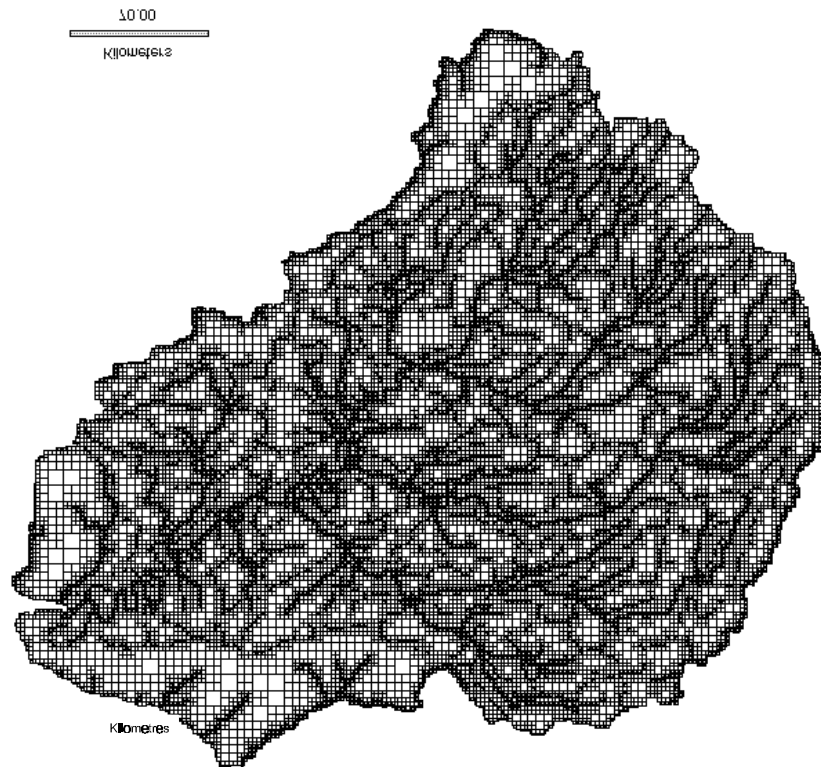
Les couches d'informations, issus du traitement par le S.I.G., vont être utilisées par le programme SIGMOD (Golaz-Cavazzi, 1995) pour permettre la construction automatique du maillage. Le fichier obtenu sera utilisable comme fichier d'entrée de GEOCOU.

Pour obtenir des mailles carrées emboîtées, les mailles du M.N.T. sont regroupées suivant certains critères :

- critères topologiques : les 4 mailles candidates au regroupement doivent être de la même taille. De plus, le regroupement doit respecter les règles de voisinage : 4 mailles d'ordre n ne pourront être regroupées que si elles n'ont pas de voisines d'ordre n-1.
- critères hydrologiques : une description correcte des échanges nappes/rivières nécessite de garder une description fine au niveau des cours d'eau. Les regroupements sont alors interdits lorsqu'une maille

est en rivière. Par ailleurs, afin de respecter les surfaces mises en jeu, 4 mailles ne seront regroupées que si elles appartiennent à un même sous-bassin versant.

En appliquant cette méthode au domaine de surface (95390 mailles de 1 km<sup>2</sup>), le nombre de mailles a été réduit à 35540 (figure 3).



**Figure 3.** *Maillage de la couche de surface*

Le modèle hydrologique effectue le transport de l'eau de surface, pour chaque sous-bassin, en tenant compte de la durée du trajet de la maille jusqu'à l'exutoire du sous-bassin. Ce calcul implique la discrétisation des sous-bassins en zones isochrones rassemblant les mailles qui présentent une durée de trajet identique jusqu'à l'exutoire (figure 4). Ces temps de transfert sont calculés à partir du maillage initial. Un temps de transit sur la maille est calculé :

$$t_i = \frac{dl}{\sqrt{p}}$$

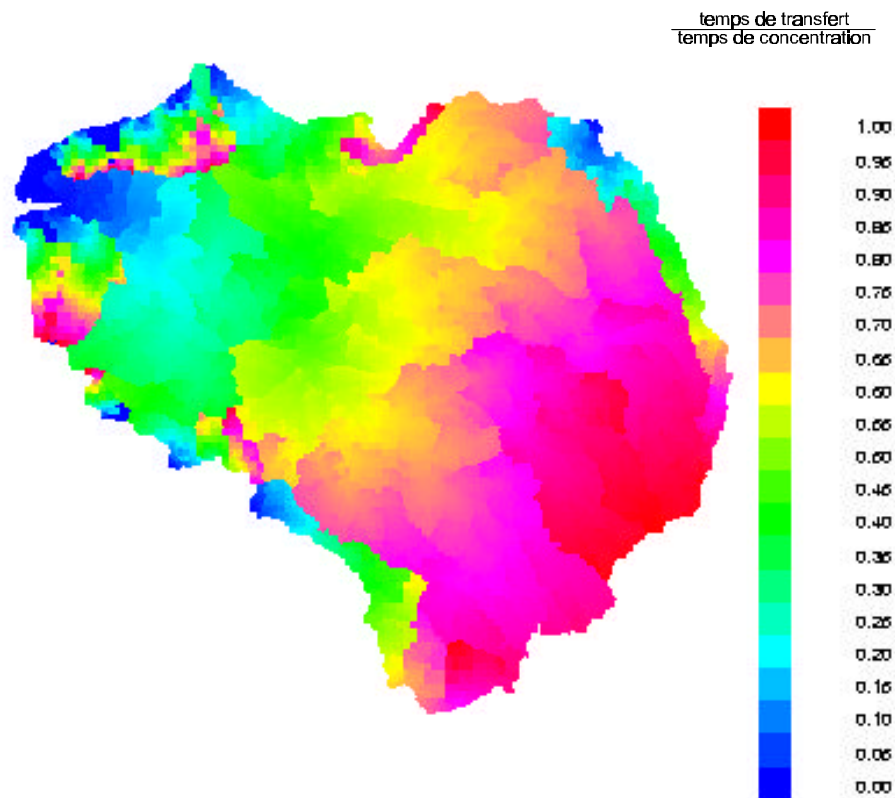
où dl : pas d'espace du M.N.T.

p : valeur absolue de la pente entre la maille courante et sa maille aval (lorsque la pente est nulle, celle-ci est remplacée par une valeur minimale).

Ensuite, en partant de l'aval, les temps de transfert sont calculés en sommant les temps de transit sur les mailles rencontrées sur le chemin menant de l'exutoire à la maille courante.

En prenant la valeur absolue de la pente, on s'affranchit des problèmes de contre pente. Cependant, les valeurs des temps de transfert ainsi calculés n'ont pas forcément beaucoup de sens vis-à-vis de l'écoulement. Par la suite, il serait donc nécessaire d'améliorer le calcul de ces pentes.



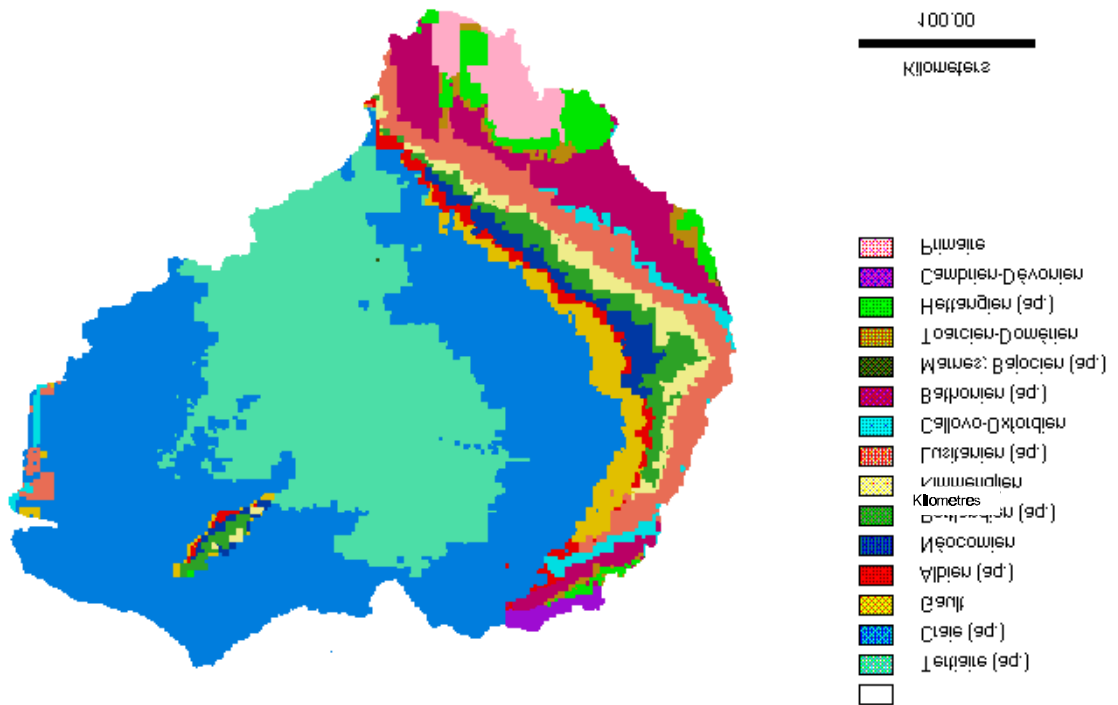


**Figure 4.** Zones isochrones.

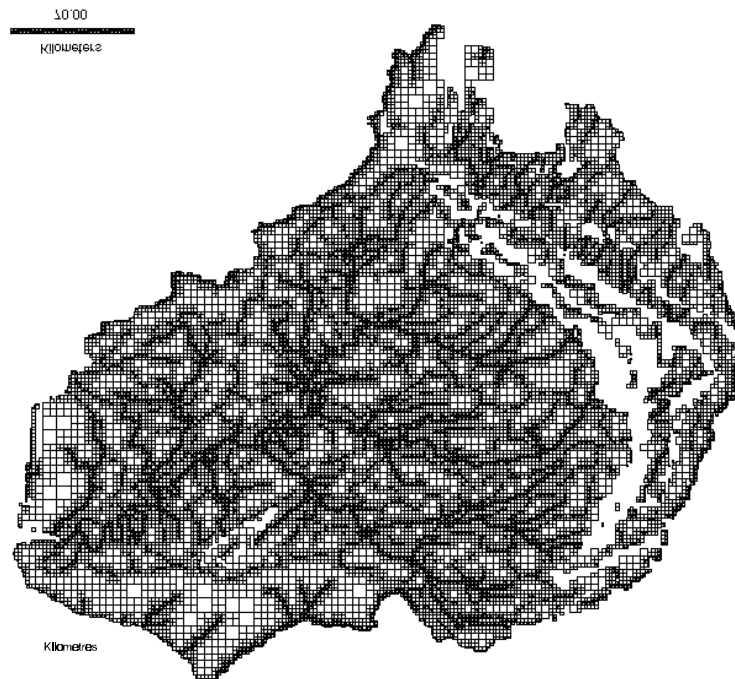
#### *Géologie du domaine d'étude*

Le Bassin de Paris est constitué par un ensemble de terrains sédimentaires reposant sur un socle anté-permien et limité par les massifs hercyniens affleurants. Les couches les plus jeunes se trouvent au centre du bassin, tandis que les plus anciennes occupent la périphérie. Huit ensembles hydrogéologiques principaux ont été retenus sur la zone d'étude (Wei, 1990; Certes et al. 1997) : les aquifères du Tertiaire, la nappe de la Craie, de l'Albien, du Néocomien, du Portlandien, du Lusitanien, du Dogger, et du Lias (figure 5). On en déduit le maillage de la couche souterraine au niveau de la partie libre des aquifères (figure 6).

Au niveau de l'auréole constituée par les terrains du Tertiaire, de nombreuses relations existent entre la nappe de la Craie et les aquifères du Tertiaire, et entre les aquifères du Tertiaire eux-mêmes. Ainsi, de manière à représenter les écoulements souterrains dans cette région, il sera envisagé, par la suite, de superposer plusieurs couches figurant les différents aquifères à cet endroit (Mégnién, 1970; Pomerol et Feugueur, 1986).



**Figure 5.** Carte géologique du domaine d'étude.



**Figure 6.** Maillage de la couche souterraine.

### 3 Perspectives

La structure du modèle est donc établie, et pourra évoluer dans la partie souterraine notamment pour ce qui concerne les aquifères du Tertiaire.

A présent, la phase de calage du modèle nécessite différents types de données. La perspective immédiate de ce travail est donc de constituer :

- une base données physiographiques
- une base de données météorologiques
- une base de données hydrométriques
- une base de données piézométriques

### 4 Références

Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M., Ruget F., Nicoulaud B., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Durr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J., Meynard J., Delécolle R. (1998). STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. 1- theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie*. **18**, 311-346

Certes C., Escalier des Orres P., Goblet P., Levassor A., Marivoet J. (1997). Evaluation of elements responsible for the effective engaged dose rates associated with the final storage of radioactive waste : Everest project. *European Commission*.

Golaz-Cavazzi C. (1995). Exploitation d'un modèle numérique de terrain pour l'aide à la mise en place d'un modèle hydrologique distribué. *DEA UPMC*, 71p.

Leblois E. (1993). De l'hydrologie avec le SIG raster Idrisi. Rapport technique, *Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts*, 75p.

Ledoux E. (1980) ; Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements sur un bassin hydrologique ; *Thèse ENSMP-UPMC*.

Ledoux E., Girard G., Villeneuve J.P. (1984). Proposition d'un modèle couplé pour la simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. *La Houille Blanche*, pp101-110.

Mégrien C. (1970). Atlas des nappes aquifères de la région parisienne. *Editions BRGM*.

Pomerol C, Feugueur L. (1986). Guides géologiques régionaux. Bassin de Paris. *Masson*.

Razianoff S., Julien P., Cervelle B., Chorowicz J. (1992). Extraction et analyse automatique d'un réseau hiérarchisé de thalwegs. Application à un modèle numérique de terrain dérivé d'un couple stéréoscopique spot. *Int. Remote*.

Skidmore A.K. (1989). A comparison of techniques for calculating gradient and aspect from a gridded elevation model. *Int. J. Geographical Information Systems*.

Wei H.F. (1990). Modélisation tridimensionnelle du transfert d'eau, de chaleur et de masse dans l'aquifère géothermique du Dogger dans le Bassin de Paris. *Thèse ENSMP*.

Sommaire  général

**Introduction du thème :  
Transferts d'azote**

**Les principes du modèle couplé  
Illustration sur le bassin du Rhône  
Etat d'avancement sur le bassin de la Seine**

**La démarche de modélisation régionale des écoulements d'eau, de  
la production et du transfert d'azote sur le bassin de la Seine,  
structure du modèle d'écoulement**

**Spatialisation de la dynamique des activités agricoles dans le  
bassin de la Seine**

**Bilan des transferts d'azote dans le bassin de la Seine:  
l'approche du modèle SENEQUE**