

Les principes du modèle couplé

Illustration sur le bassin du Rhône

Etat d'avancement sur le bassin de la Seine

Catherine Golaz, Eric Gomez, Emmanuel Ledoux

1 Le modèle hydrologique

Ce modèle est issu d'une étroite collaboration entre l'INRS-Eau au Québec, l'ORSTOM et le CIG. Il a pour objectif la simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains en aquifère multicouche. On utilise pour cela la méthode des différences finies mise en œuvre sur des mailles carrées emboîtées de taille variable. La simulation des écoulements de surface s'inspire du modèle CEQEAU, et la simulation des écoulements souterrains s'inspire du modèle NEWSAM.

La caractéristique principale de la méthode retenue est de découper le cycle hydrologique en maillons indépendants tant que faire se peut. Cette décomposition permet de contrôler séparément chaque maillon de la chaîne. 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 (Ledoux, 1980).

Pour schématiser le cycle de l'eau, le modèle distingue cinq fonctions interconnectées :

– **la fonction d'entrée.**

Elle prend en compte les précipitations et les échanges à travers les limites du système modélisé. C'est à ce niveau qu'est traité le problème de la gestion de la fonte nivale.

– **la fonction production.**

Le domaine modélisé est divisé en zones de production. La définition de ces zones s'appuie sur les types de sol et de couvert végétal. A chacune de ces zones on associe une fonction de production qui répartit l'entrée entre infiltration, ruissellement, évapotranspiration et stockage dans le sol. La modélisation de cette fonction est basée sur le principe des modèles à réservoirs.

– **la fonction de transfert de surface.**

Elle achemine à travers le domaine de surface l'eau destinée au ruissellement (résultat de la fonction de production), ainsi que l'eau issue des échanges avec le milieu souterrain.

– **la fonction de transfert du souterrain.**

Elle simule l'écoulement dans les aquifères suivant les lois du milieu poreux.

– **la fonction d'échange surface-souterrain.**

Elle calcule les échanges à double sens entre les deux milieux au niveau des points situés sur le réseau hydrographique principal.

1.1 L'élaboration de la structure multicouche - programme GEOCOU :

Le modèle étudié est discrétisé en une structure multicouche utilisant des mailles carrées emboîtées, mailles auxquelles sont rattachées les caractéristiques du domaine (direction de drainage, altitude minimale, distribution des zones de production pour les mailles de la couche de surface ; transmissivité, coefficient d'emmagasinement... pour les mailles des couches souterraines). Le principe d'emboîtement

s'exprime de la façon suivante : une maille ne peut avoir comme voisine, dans les directions horizontales et verticales, qu'une maille de même taille ou quatre fois plus petite ou quatre fois plus grande.

Le modèle distingue une couche superficielle, au niveau de laquelle s'effectue d'abord le partage entre ruissellement et infiltration, puis le transfert superficiel, et une ou plusieurs couches profondes, éventuellement connectées où s'effectuent les transferts souterrains.

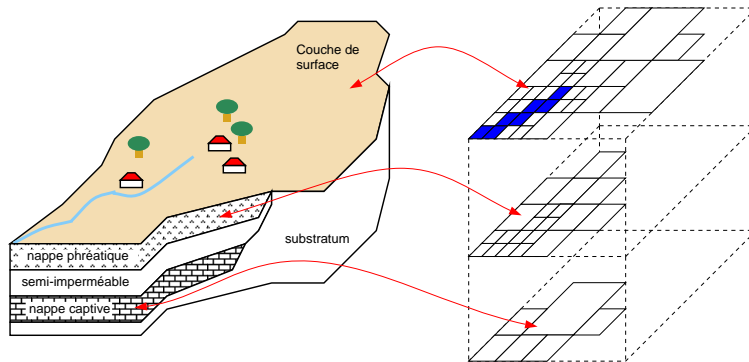


FIG. 1: Principe de la schématisation multicouche, d'après Ledoux(1980)

En surface l'eau est transférée en suivant un réseau de drainage, qui revêt la forme d'une ou plusieurs arborescences définies sans ambiguïté à partir des directions de drainage (unique pour chaque maille).

Ce réseau se décompose en :

- réseau hydrographique principal : regroupe les mailles du réseau hydrographique principal au niveau desquelles pourront s'effectuer les échanges avec le domaine souterrain, mais surtout où pourront être calculés les débits. Dans la suite du texte, on appellera les mailles de ce réseau "mailles rivières".
- la zone de ruissellement pur : regroupe les mailles des versants. On définit ainsi pour chaque maille rivière un sous-bassin de calcul : ensemble des mailles se drainant vers cette maille rivière et dont le chemin n'a pas encore croisé de maille rivière.

Cette subdivision permet d'alléger les calculs. Le routage du ruissellement sur les sous-bassins de calcul et les échanges nappes-rivières n'étant calculés qu'au niveau de ces mailles rivières.

C'est également au niveau de GEOCOU qu'est calculé le temps de transfert $ttf(i)$ jusqu'à l'exutoire à partir de chaque maille i . Pour cela, en partant de la maille i , on descend le long du réseau de drainage en sommant les temps de transit $ttra_{i \rightarrow j}$ entre deux mailles successives i et j .

$$ttra_{i \rightarrow j} = \frac{dl}{\sqrt{pe}}$$

$$ttf(i) = \sum_{i \rightarrow ex} ttra_{j \rightarrow k}$$

avec dl la distance entre les centres des mailles i et j , et pe la pente entre les mailles i et j $pe = (z(i) - z(j))/dl$, avec $z(i)$ et $z(j)$ les altitudes des centres des mailles i et j .

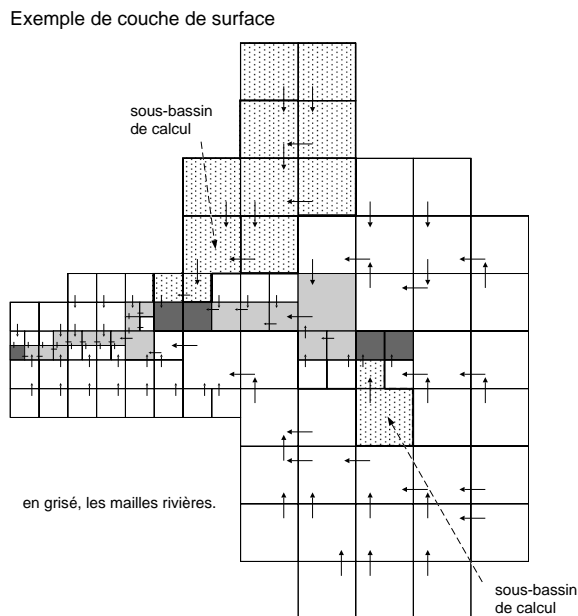


FIG. 2: Principe de discrétisation du domaine de surface

1.2 Bilan hydrique des précipitations et transfert du ruissellement - programme MOD-SUR :

Bilan hydrique

Ce programme a pour objectif principal la répartition de la lame d'eau disponible au sol entre le ruissellement, l'évapotranspiration, l'infiltration et la quantité stockée dans le sol. Le calcul est effectué au pas de temps des données météorologiques, au niveau de chaque zone météo et pour chaque zone de production, représentée par une fonction de production.

Le domaine est découpé en un certain nombre de zones météo, où les forçages (précipitations, température moyenne, et évapotranspiration potentielle) sont homogènes.

Les fonctions de production sont des modèles à neuf paramètres (dont deux d'initialisation) appartenant à la catégorie des modèles à réservoir.

Sens des différents paramètres :

- Paramètres d'initialisation :
r et rnap sont initialisés en début de simulation. Classiquement si la simulation débute en été, on considère que le réservoir sol et le réservoir de transfert de la lame infiltrée sont plutôt vides. Si elle débute en hiver, ils sont plutôt pleins.
- Réservoir de bilan :
dcr : valeur minimale en mm du stock en eau dans le sol, en deça de laquelle aucune quantité d'eau n'est disponible. Dcr règle principalement le rôle des premières pluies après une période de sécheresse.
crt : valeur moyenne en mm du stock en eau dans le sol. L'évapotranspiration réelle croît en fonction de crt (à dcr constant).
- Réservoirs de partition :
rir : valeur maximale de l'infiltration sur un pas de temps en mm. rir régit le partage entre ruissellement et infiltration.

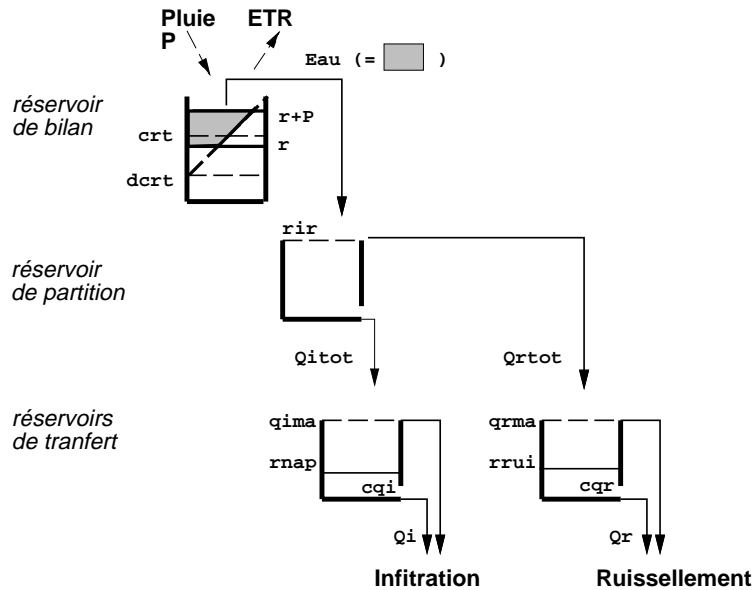


FIG. 3: Schématisation d'une fonction de production

– Réservoirs de transfert :

cqr : coefficient de tarissement du réservoir de ruissellement.

qrmax : niveau de débordement du réservoir de ruissellement.

Ces deux paramètres établissent la répartition entre ruissellement pur et ruissellement retardé (à rapprocher du ruissellement hypodermique).

cqi : coefficient de tarissement du réservoir d'alimentation de la nappe.

qimax : niveau de débordement du réservoir d'alimentation de la nappe.

Ce réservoir de transfert induit un retard entre l'infiltration et l'alimentation de la nappe.

Transfert des lames ruisselées

Le transfert des lames ruisselées aux niveaux des sous-bassins de calcul est effectué au niveau de MODSUR. Ce transfert se fait par isochronisme. Chaque sous-bassin de calcul est divisé en un nombre de zones isochrones égal au nombre de pas de temps de calcul maximum nécessaire pour rejoindre la maille rivière depuis une maille de ce sous-bassin.

La lame ruisselée $Qr_i(t)$ arrivant au pas de temps t au niveau de la maille rivière i se calcule alors suivant la formule :

$$Qr_i(t) = \sum_{k=0}^{K-1} \left(\sum_{j=1}^{N_k} qr_j(t - kdt) \right)$$

où K est le nombre de zones isochrones, N_k le nombre de maille de la zone isochrone k , et $qr_j(t - kdt)$ la lame ruisselée déduite du calcul du bilan hydrique, au niveau de la maille j au temps $t - kdt$.

Récapitulation des entrées et sorties de MODSUR

La mise en œuvre de MODUR nécessite donc :

- d'associer à chaque maille un poste météorologique.
- de recueillir les données météorologiques suivantes : lames d'eau incidentes (pluie + lame de fonte), et évapotranspirations potentielles.

- de choisir les modèles des fonctions de production et d'en déterminer les paramètres.
- d'évaluer le temps de concentration du bassin, nécessaire pour effectuer le découpage en zones isochrones.

En sortie, nous disposons :

1. des lames infiltrées au niveau de chaque maille du domaine de surface.
2. des lames ruisselées parvenant au niveau de chaque maille rivière.

1.3 Le transfert dans la zone non saturée - programme NONSAT :

Ce module est utilisé lorsque le réservoir de transfert de la lame infiltrée, au niveau de MODSUR, ne permet pas d'induire un retard suffisant entre le drainage à la base du réservoir de partition et l'alimentation de la nappe.

Le domaine modélisé est discrétisé en zones homogènes du point de vue des transferts dans la zone non saturée. A chacune de ces zones homogènes est affecté un couple de paramètres N et τ .

N est le nombre de réservoirs de la cascade de Nash qui reflète l'épaisseur de la zone non saturée, représentée ainsi par N couches horizontales homogènes, et τ est la constante de temps de vidange des réservoirs qui caractérise la vitesse de percolation à travers le milieu non saturé.

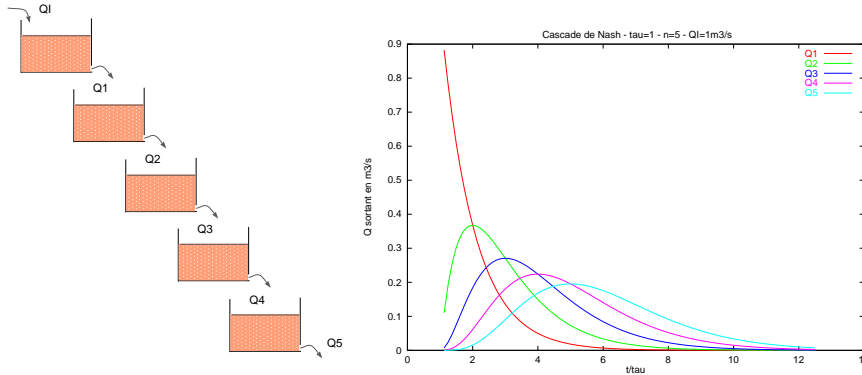


FIG. 4: Principe du modèle de Nash

Le débit à l'instant t à la sortie du Nième réservoir résultant d'une recharge brusque d'amplitude δQI appliquée au premier réservoir à l'instant τ inférieur à t s'exprime alors par :

$$Q_N(t) = \frac{\delta QI(\tau)}{\tau * (N - 1)!} * e^{-(t-\tau)/\tau} * \left(\frac{t - \tau}{\tau}\right)^{N-1}$$

Ces deux paramètres sont ajustés par calage en comparant notamment les piézométries mesurées et simulées.

En sortie de NONSAT, nous disposons d'un fichier similaire à celui issu de MODSUR dans lequel :

1. ont été retranscrites telles qu'elles les lames ruisselées parvenant aux mailles rivières
2. sont transcrites les lames infiltrées parvenant à la nappe, après prise en compte du retard du au transfert dans la zone non saturée.

1.4 Les transferts conjoints superficiels et souterrains - programme MODCOU

Ce programme simule le devenir de l'eau disponible à travers les deux domaines en tenant compte de leur interaction définie dans la fonction d'échange surface-souterrain. C'est à l'issue de cette dernière étape que l'on dispose des débits simulés aux exutoires et aux stations, et des niveaux piézométriques simulés.

Transfert dans le domaine souterrain

Cette partie du modèle s'appuie sur l'intégration de l'équation de diffusivité régissant les écoulements en milieux poreux. Couramment utilisée en hydrogéologie, cette technique est abondamment présentée dans la notice du programme NEWSAM (Levassor et Ledoux, 1993) qui a inspiré cette partie de MODCOU.

Le domaine souterrain est schématisé par une succession de couches représentant les niveaux perméables, sièges d'écoulements subhorizontaux. Les transferts entre ces couches, au niveau de semi-imperméables supposés non-capacitifs, sont considérés comme monodimensionnels, perpendiculaires aux couches.

Au niveau de chaque couche, l'équation s'écrit :

$$S \frac{\delta h}{\delta t} + q + q_{sup} + q_{inf} = div(T.grad(h))$$

où :

h est la charge hydraulique

T le tenseur de transmissivité

S le coefficient d'emménagement

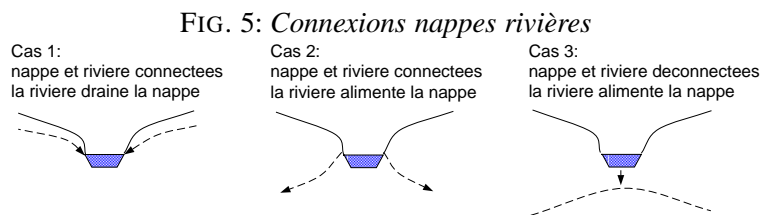
q le débit volumique injecté ou prélevé par unité de surface

q_{sup} et q_{inf} les débits échangés à travers les semi-imperméables supérieur et inférieur.

A chaque pas de temps, la résolution de ces équations, par la méthode des différences finies, fournit la charge hydraulique en tout point du domaine souterrain.

Echanges surface-souterrain

A chaque pas de temps, la piézométrie évolue et les échanges nappes rivières sont recalculés. Trois cas de figures peuvent se présenter.



Dans les deux premiers cas le débit se calcule par :

$$Q1 = TP * (H - Ho), Q1 \geq 0. \text{ car } H \geq Ho$$

$$Q2 = Tp * (H - Ho), Q2 \leq 0. \text{ car } H \leq Ho$$

avec H la charge de la nappe, Ho le niveau de la rivière, et TP un coefficient de transfert nappe rivière décrivant l'état de colmatage du lit.

Dans le dernier cas, on a $Q3 = Qo$, où Qo est le débit limite pouvant s'infiltrer dans le lit. Ce débit Qo est un des paramètres d'entrée du modèle.

Dans tous les cas le débit échangé est le maximum des trois termes : volume disponible dans la maille, débit limite infiltrable Qo , et opposé du débit échangeable étant donné la différence de charge ($Q1$ ou $Q2$) (la convention de signe utilisée veut que ce qui entre dans la nappe soit positif).

Transfert dans le réseau hydrographique

MODCOU simule de plus le transfert dans le réseau hydrographique. Celui-ci est découpé suivant les zones isochrones en biefs. Chaque bief a un coefficient de vidange xkb : le volume sortant d'un bief est égal à $xkb * V$ (volume en eau du bief).

Le volume écoulé à l'aval d'une succession de biefs se déduit de la formule :

$$V_a(t + dt) = (1 - xkb_a) * (V_a(t) + Qr_a(t) + Qnap_a(t)) + \sum_{j=1}^{j=N} xkb_j * (V_j(t) + Qr_j(t) + Qnap_j(t))$$

c'est à dire (volume du bief a après vidange) + (somme des vidanges des N biefs situés en amont de a).
où

$V_i(t)$ est le volume d'eau contenu dans le bief i au temps t,

$Qr_j(t)$ est la lame ruisselée parvenant au bief j entre t et t+dt

$$Qr_j(t) = \sum_{i=1}^{i=n} qr_i(t)$$

somme des lames ruisselées parvenant au n mailles rivières constituant le bief.

$Qnap_j(t)$ est le volume échangé avec le domaine souterrain au niveau du bief j entre t et t+dt

$$Qnap_j(t) = \sum_{i=1}^{i=n} qnap_i(t)$$

somme des volumes échangés au niveau des n mailles rivières constituant le bief.

2 Application au bassin versant du Rhône

2.1 Construction du modèle Rhône

Ce travail est un élément du projet GEWEX-Rhône, auquel participent : le CEMAGREF, le CNRS/CETP, le CIG et METEO-FRANCE/CNRM

2.1.1 Domaine de surface du modèle RHÔNE

Maillage et banque de drainage

Le bassin du Rhône à Beaucaire, totalisant $86496 km^2$, a été discrétisé en 27054 mailles de 1 à 8 km de côté, dont 2982 en rivières.

coté de la maille	nb de mailles
1km	12596 dont 678 en rivière
2km	13123 dont 2304 en rivière
4km	13334
8km	1

Zones de production

L'analyse des données de la base INRA, menée au CETP, a conduit à distinguer 6 catégories de matériaux parentaux¹ principaux (C'est le matériau couvrant plus de 50 % de la surface d'un pixel) :

- all : dépôts alluviaux ou glaciaires (ou colluvions)
- cal : roches carbonatées (calcaires et dolomies)
- arg : marnes et roches argileuses
- sab : roches sableuses et formations détritiques
- lim : roches limoneuses
- cri : socles cristallins et cristalloyphylliens.

1. matériau dont la dégradation a conduit au sol en place

La carte des types d'occupation s'appuie sur la base de données CORINE LAND COVER. Les catégories distinguées et prises en compte pour l'établissement de la carte des fonctions de productions sont :

frt : forêt
 eau : eau libre
 ice : neige et glace
 imp : roches nues et villes
 dif : différent des 4 précédents

Ces informations ont été extraites avec un pas de 500m, et transcrites sous forme de pourcentages au pas kilométrique.

TAB. 1: Définition des zones de production

zone	type de sols	mode d'occupation
1	all	frt
2	tous	eau
3	cal	frt
4	arg	frt
5	sab	frt
6	lim	frt
7	cri	frt
8	all	dif
9	cal	dif
10	arg	dif
11	sab	dif
12	lim	dif
13	cri	dif
14	tous	imp
	tous	ice

On a représenté sur la carte suivante la zone de production dominante de la maille.

TAB. 2: Répartition des zones de production sur les principaux sous-bassins

Bassin	z.1	z.2	z.3	z.4	z.5	z.6	z.7	z.8	z.9	z.10	z.11	z.12	z.13	z.14	z.3+9
Saône	3	< 1	15	5	3	6	3	9	25	11	2	16	5	0	39
Ain	< 1	< 1	45	0	0	10	0	6	32	0	0	5	0	0	77
Isère	3	< 1	18	0	0	< 1	11	8	24	0	0	3	29	3	42
Durance	< 1	< 1	29	3	0	< 1	2	4	48	2	0	< 1	10	< 1	77
Rhône	2	< 1	21	2	1	4	7	9	27	4	2	9	11	< 1	48

On observe la dominance des zones associées à un type de sol calcaire, zones 3 et 9.

2.1.2 Données disponibles

Les mesures hydrométriques

130 chroniques de débits observés au niveau de stations drainant plus de $250km^2$ ont été extraites de la base HYDRO, sur la période 1980-1995. Elles serviront au calage et à la validation du modèle.

Carte 2 : Zones de production dominantes,
d'ap. BD INRA et CORINE LAND COVER

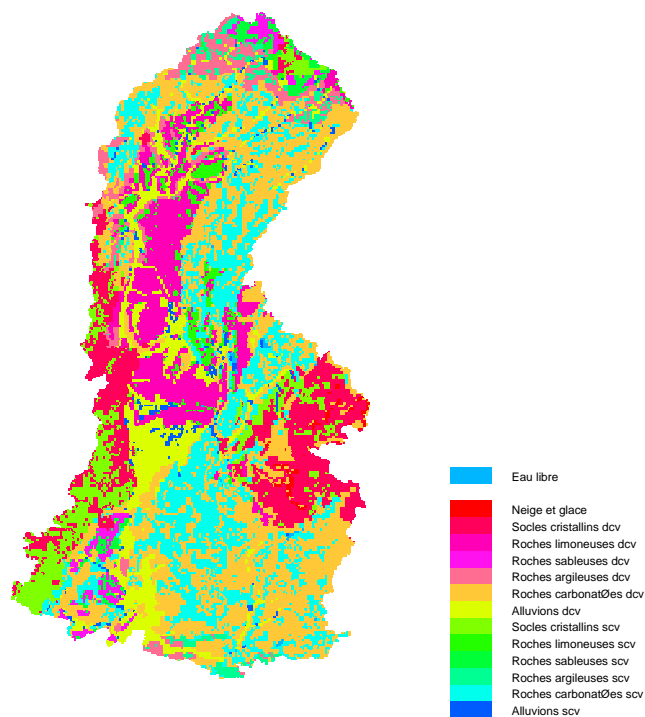


FIG. 6: Zones de production - type dominant par maille

Dans les bassins de l'Isère, de la Durance et de l'Ardèche, les aménagements anthropiques ont localement fortement perturbé les régimes naturels. Le modèle restitue des débits simulés "naturels", qu'il faut comparer aux chroniques observées. Le problème est donc ici de naturaliser des chroniques observées perturbées par la présence des aménagements. Des techniques ont été mises en œuvre à EDF en un certain nombre de stations afin de reconstituer les chroniques mensuelles voire journalières, chroniques qui pourraient être mises à notre disposition.

Les données météorologiques

Elles nous sont transmises par Météo France sous la forme de champs interpolés sur une grille d'un pas de 8 km. Les données fournies sont : les précipitations liquides, les précipitations solides, les températures moyennes, et les ETP, le tout au pas de temps journalier. Ces données sont issues de la mise en œuvre de SAFRAN sur les 247 zones du maillage SYMPOSIUM couvrant le bassin.

Principe de SAFRAN L'acronyme SAFRAN signifie Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige. Son but initial est de fournir au pas de temps horaire, avec une discrétisation verticale : température de l'air à la surface, vent, humidité de l'air, nébulosité, pression, précipitations liquides et solides, rayonnement atmosphérique et rayonnement solaire incident (direct et diffus), sur les massifs alpins et pyrénéens.

Cette analyse est effectuée au niveau de massifs homogènes d'un point de vue climatologique.

C'est une méthode d'interpolation qui prend tout à la fois en compte : les sorties d'un modèle à méso-échelle (20 à 100 km)² et les observations disponibles.

$$Y_k^a = Y_k^m + \sum_{i=1}^{i=n} p_{ik} (Y_i^o - Y_i^m)$$

k est le point où l'on cherche à obtenir la valeur de la variable Y. Les indices a, m et o signifient : analysé, issu du modèle, observé. n est le nombre d'observation. p_{ik} est le poids de l'observation X en i dans la détermination de la variable analysée au point k.

Une analyse similaire est désormais possible sur la France entière suite au projet SYMPOSIUM. SAFRAN est le premier chaînon d'une suite de modèles : SAFRAN - CIRIS/ISBA - MODCOU, utilisés pour la modélisation couplée hydro-météorologique.

Application au bassin du Rhône

SAFRAN utilise donc à la fois des observations et les sorties d'un modèle atmosphérique à moyenne échelle. Ici les observations sont constituées par les données relevées en environ : 60 stations synoptiques et 1600 stations du réseau climatique. Les simulations sont issues du modèle CEPMMT (modèle du Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme) à une résolution de 1.5°C.

2.1.3 Elaboration du modèle du domaine souterrain

En dehors de la plaine de la Saône et du couloir rhodanien, le bassin versant possède peu de nappe étendue. C'est pourquoi l'effort de modélisation n'a conduit ici qu'à représenter le pouvoir capacitif des aquifères.

Maillage

Le contour du domaine souterrain a été délimité à partir d'un scan de la carte géologique de France au 1/1.000.000 ème. On a ensuite extrait la partie du maillage de surface contenue dans ce contour, ce qui a conduit à l'obtention du maillage du domaine souterrain. Cette opération a été menée au moyen d'IDRISI.

Affectation des paramètres

Paramètres internes : transmissivité T et coefficient d'emmagasinement S

Dans un premier temps nous considérerons que T et S sont homogènes au niveau de la nappe d'accompagnement d'une rivière. C'est pourquoi nous avons fait un découpage du domaine souterrain selon les limites des sous-bassins versants. Puis pour simplifier davantage encore l'affectation des valeurs de T et S, nous avons regroupé les 75 unités délimitées à l'étape précédente en 9 zones où T et S seront pris homogènes.

Ces 9 zones sont :

- 1 - 4 - 6 : plaine de la Saône, d'amont en aval.
- 2 : vallée de la Vingeanne.
- 3 : vallées de l'Ouche, de la Norge et de la Tille.
- 5 : basse vallée du Doubs,
- 7 - 8 - 9 : couloir du Rhône d'amont en aval.

2. Cet état de l'atmosphère fourni par le modèle porte le nom d'ébauche. Ces modèles sont ARPEGE ou le CEPMMT

Après calage des débits sur les années 86-89, nous parvenons aux valeurs suivantes pour T et S :

zone	T m^2/s	s adim.
1	3 e-3	2 e-2
2	3 e-3	2 e-2
3	3 e-3	2 e-2
4	5 e-2	2 e-2
5	3 e-2	0.5 e-2
6	5 e-2	1 e-2
7	5 e-2	2 e-2
8	3 e-3	1 e-2
9	5 e-4	4 e-2

Echanges nappes-rivières

Les niveaux de drainage ont été extrait du modèle numérique de terrain. Pour chaque maille rivière, on a pris l'altitude minimale des mailles (une ou quatre) de base qui la constituent.

Sans données supplémentaires, les coefficients d'échanges nappes-rivières ont été pris égaux à 1..

Conditions limites

La limite du domaine correspond à une limite à flux nul.

Conditions initiales

Le niveau piézométrique a été initialisé en régime permanent, en cherchant à retrouver les débits de base des rivières concernées en particulier celui de la Saône. Une alimentation surfacique correspondant à une lame infiltrée annuelle de 200 mm a été injectée en chacune des mailles.

2.1.4 Cas particuliers des domaines karstiques

La composante MODSUR du modèle hydrologique a été adaptée afin d'intégrer une représentation simplifiée des circulations dans les chenaux karstiques.

Pour cela nous avons donc "inventer" les mailles tuyaux. Une fraction du ruissellement arrivant sur la maille "perte" est transmise directement à la maille "sortie".

Les régions karstiques présentent dans le bassin se situe principalement dans le Jura et dans le Vaucluse.

Maille amont	Maille aval	Pourcentage transféré	Localisation
5575	5400	40%	transfert Doubs → loue

D'autres tuyaux doivent être posés au niveau du plateau du Vaucluse, car les débits simulés au niveau du Coulon, exutoire du système karstique, est largement sous-estimé.

2.2 Simulation des années passées

2.2.1 Calage des paramètres

Pour cette étape les années utilisées sont 1986-1989.

Estimation du temps de concentration du bassin

Une simulation en ruissellement simple ($f_n=0.$, $c_{qr}=1.$, $t_c=1.$) a conduit à évaluer le temps de concentration du bassin versant de la Saône à Macon à 4 jours (décalage des pics de crue observés et simulés), ce qui est compatible avec un temps de concentration à Beaucaire d'environ 9 jours et un paramètre (α) de 0.25.

Paramètres des fonctions de production

Nous avons tout d'abord identifié un certain nombre de stations, où dominaient clairement deux ou trois fonctions de production. Puis nous avons cherché à caler le débit à ces stations en ajustant les paramètres de ces fonctions. A l'issue de cette phase de calage, nous obtenons les valeurs suivantes :

Paramètres finaux

Fonction de production	crt (mm)	dcrt (mm)	r (mm)	fn (mm)	cqr (adim)	qrmax (mm)	cqi (adim)	qimax (mm)	rnap (mm)
all-frt	90.	50.	0	10	0.8	100	0.1	100	10
cal-frt	52.	10.	0	10	0.2	90	0.02	100	10
arg-frt	110.	50.	0	10	0.6	100	0.1	100	10
sab-frt	110.	50.	0	10	0.6	100	0.1	100	10
lim-frt	110.	50.	0	10	0.6	100	0.1	100	10
cri-frt	90.	50.	0	10	0.1	100	0.01	100	90
all-dif	70.	50.	0	10	0.3	150	0.08	150	10
cal-dif	61.	10.	0	20	0.3	90	0.15	90	10
arg-dif	110.	50.	0	10	0.4	100	0.1	100	10
sab-dif	110.	50.	0	10	0.6	100	0.1	100	10
lim-dif	100.	40.	0	10	0.5	200	0.1	100	10
cri-dif+imp	35.	10.	0	10	0.05	100	0.1	200	100
tous-ice	10.	5.	0	0	0.6	100	0.1	100	10

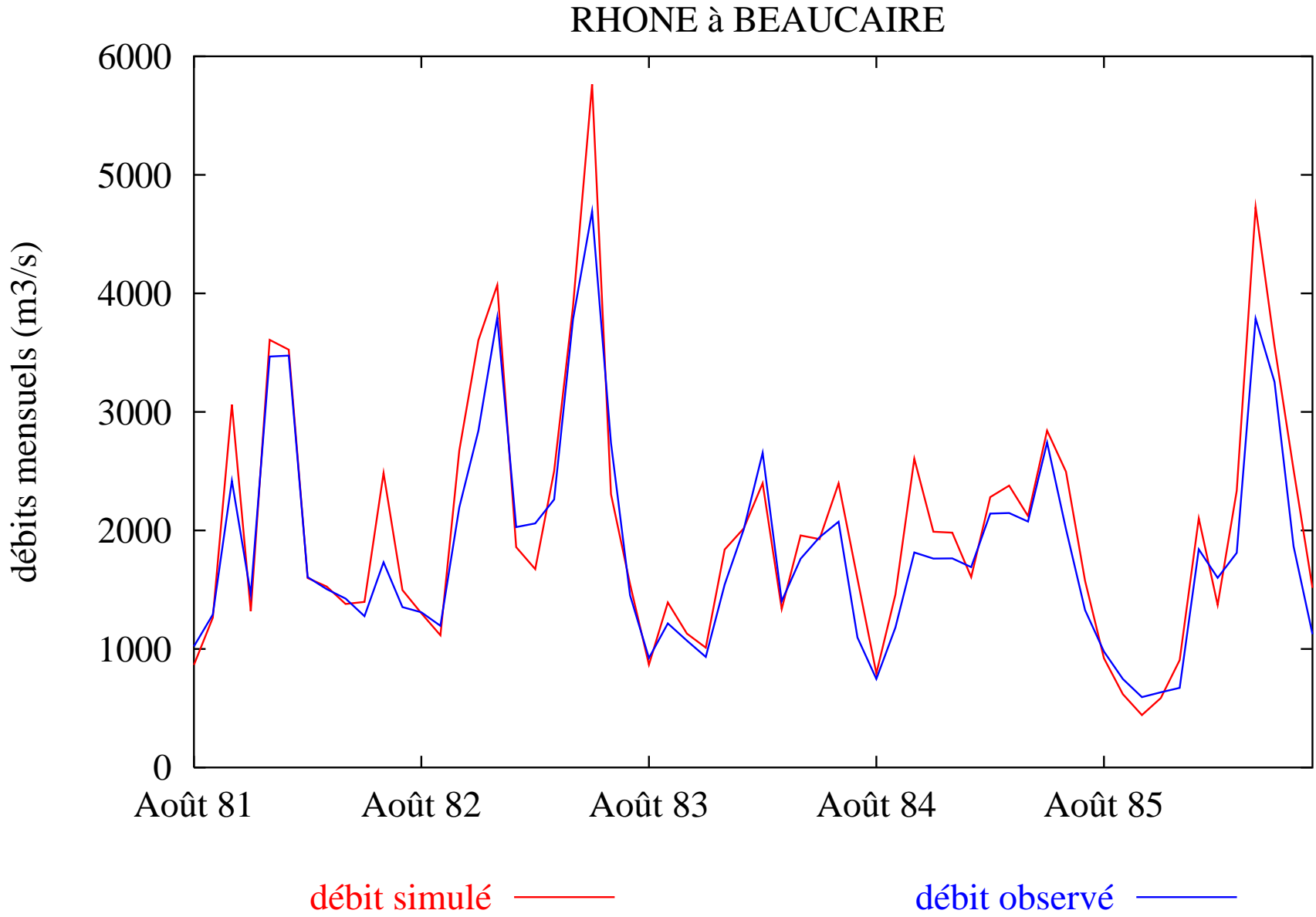
Ces paramètres sont liés aux types de sol et de végétation. Nous avons donc fait ici l'hypothèse qu'un couple sol-végétation répondait de la même façon à un épisode pluvieux (un seul jeu de paramètres pour tout le bassin). Cette hypothèse est très forte, mais minimise le nombre de paramètres à caler.

2.2.2 Validation

La simulation précédente a été étendue à l'ensemble de la période, Août 81 à Juillet 95. La qualité des résultats obtenus nous permet de valider la qualité du calage.

Le tableau suivant présente année par année la répartition des précipitations (P) en infiltration (Inf), ruissellement (Ruis), évapotranspiration réelle (ETR) et stockage dans le sol (Sol). Les précipitations sont ici la somme des précipitations liquides et de la lame de fonte.

Année	P (mm)	Inf (mm)	Ruis (mm)	ETR (mm)	Sol (mm)
86-87	1124	133	378	583	22
87-88	1286	175	524	578	8
88-89	930	101	296	541	4
89-90	861	76	228	563	2



3 Etat d'avancement sur le bassin versant de la Seine

3.1 Présentation

L'évolution importante de la production et des techniques agricoles, dans l'après-guerre, a eu de très grandes conséquences sur la qualité des milieux aquatiques avec, en particulier, un accroissement de la pollution par les nitrates et de l'eutrophisation.

Un des objectifs du PIREN-Seine est de comprendre et de modéliser l'ensemble des processus qui régissent la contamination des eaux sur le bassin de la Seine. Ainsi, il s'agit de doter le groupe de recherche d'un outil de modélisation permettant de simuler, dans un premier temps, de manière couplée, les débits dans les cours d'eau et les écoulements dans les aquifères (MODCOU) puis, dans un second temps, les transferts des nitrates dans le système hydrologique (STICS), depuis les zones d'épandages jusqu'aux exutoires en passant par les différents réservoirs souterrains. Ce modèle, une fois validé, sera utilisé à des fins prévisionnelles pour anticiper l'impact de modifications dans le futur, telles que les forçages climatiques (régime des précipitations) ou anthropiques (pratiques agricoles).

L'effort de recherche portera sur le couplage de MODCOU, présenté plus haut, avec STICS. STICS (Simulateur mulTIidisciplinaire pour les Cultures Standard) est un modèle de culture conçu comme un outil de simulation opérationnel en conditions agricoles. Ses variables de sortie sont relatives à la production, à la fois en qualité et en quantité, et à l'environnement. Ses entrées sont relatives au climat, au sol, et au système de culture. Les grands processus simulés sont la croissance et le développement de la culture, ainsi que les bilans hydriques et azotés du système sol-culture.

Le point de départ de cette tâche de modélisation est la mise en oeuvre du Modèle Hydrologique Couplé (MODCOU). Celui-ci est articulé en 4 parties principales concernant : l'élaboration de la structure (GEOCOU), le bilan hydrique des précipitations (MODSUR), le transfert dans la zone non-saturée (NONSAT), et enfin les transferts conjoints superficiels et souterrains (MODCOU). Cette étude se situe au niveau de l'élaboration de la structure du modèle.

3.2 Elaboration de la structure du modèle

Cette étude doit permettre de fournir des informations sur la discrétisation spatiale du domaine d'étude, ainsi que sur la définition du réseau de drainage superficiel.

Dans un premier temps, on utilise un modèle numérique d'altitude (M.N.A.). Un M.N.A. est une représentation numérique de la topographie sous forme d'une matrice des altitudes. En effet, la réponse hydrologique d'un bassin versant à une pluie dépend principalement de la topographie. Ainsi, la précision de la représentation de la topographie est une caractéristique fondamentale dans la compréhension des écoulements de surface et de sub-surface.

Les informations, contenues dans le MNA, feront l'objet de traitements par un système d'information géographique (S.I.G. : logiciel conçu pour gérer des informations géoréférencées). Celui que nous utiliserons est le S.I.G. IDRISI, qui, muni d'outils (Leblois, 1993), permet d'obtenir un modèle numérique de terrain (M.N.T.). Un M.N.T. rassemble plusieurs couches d'informations telles que le M.N.A., les pentes, les surfaces drainées, le réseau de drainage... Ainsi, le couplage entre le M.N.A. et le S.I.G., tel que complété par Leblois (1993), doit permettre d'extraire le réseau de drainage. La discrétisation spatiale du domaine d'étude se fera de manière automatique grâce à SIGMOD (Golaz-Cavazzi, 1995).

3.2.1 Extraction du réseau de drainage

Le modèle numérique d'altitude GTOPO30, dont nous disposons, est distribué gratuitement par l'U.S. Geological Survey's EROS Data Center (SIOUX Falls). GTOPO30 couvre l'ensemble de la surface terrestre, sous forme matricielle, à une résolution de 30 arcs secondes, c'est-à-dire 0.008333333 degrés (soit environ 1 km à l'équateur). Il couvre la zone 335000-981000WE et 2115000-2666000SN en coordonnées Lambert zone 2 (figure 7). Les valeurs d'altitude s'échelonnent de 0 à 3282 m.

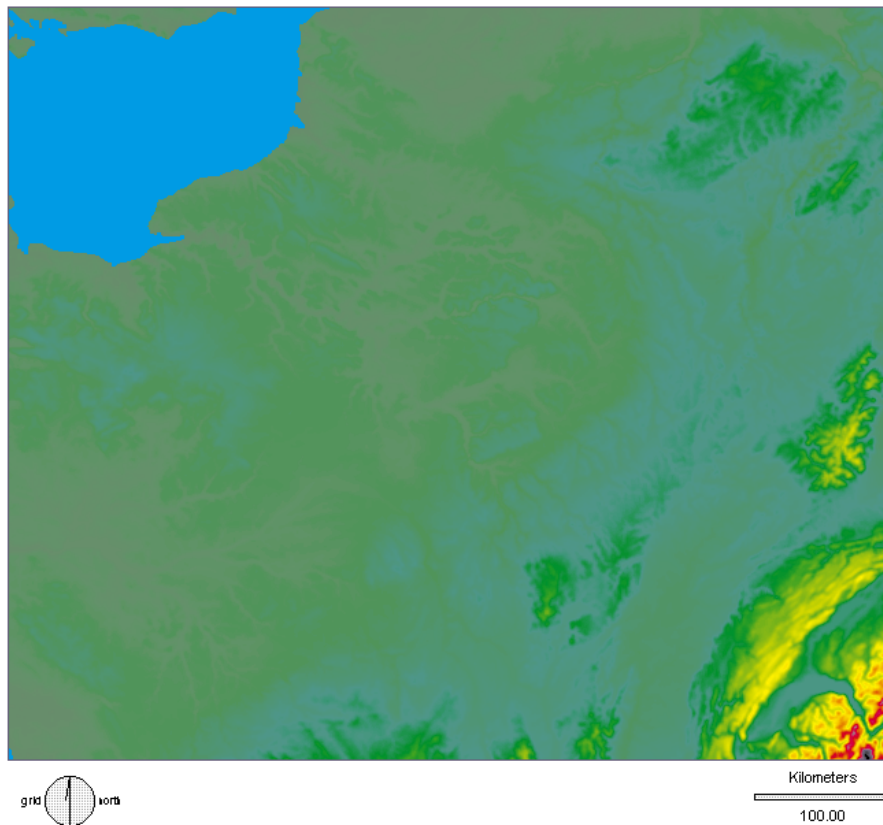


FIG. 7: *Topographie du domaine d'étude*

A partir d'un M.N.A., le programme développé par Leblois (1993) permet d'extraire le réseau hydrographique de manière automatique. Les différentes couches d'informations obtenues sont gérées par le S.I.G. IDRISI.

Le réseau hydrographique est défini en suivant les lignes de plus grandes pentes. Cependant, dans les zones planes, les directions de drainage peuvent être mal définies. Dans ce cas, on apportera des corrections manuelles.

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 km², on obtient le réseau hydrographique principal.

Ensuite, on utilise la procédure qui détermine le bassin versant d'un point particulier, en l'occurrence l'exutoire de la Seine, en s'appuyant sur une couche d'information relative aux surfaces drainées.

Cependant, les aquifères, impliqués dans le transport des nitrates, ont des zones d'alimentation qui s'étendent 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 8). Ce sont les conditions aux limites du système souterrain.

3.2.2 Discrétisation spatiale

Constitution des fichiers d'entrée pour GEOCOU

Le modèle MODCOU est un modèle spatialisé dont la discrétisation spatiale s'appuie sur un maillage à mailles carrées emboîtées. Les couches d'informations issus du traitement par le S.I.G. vont

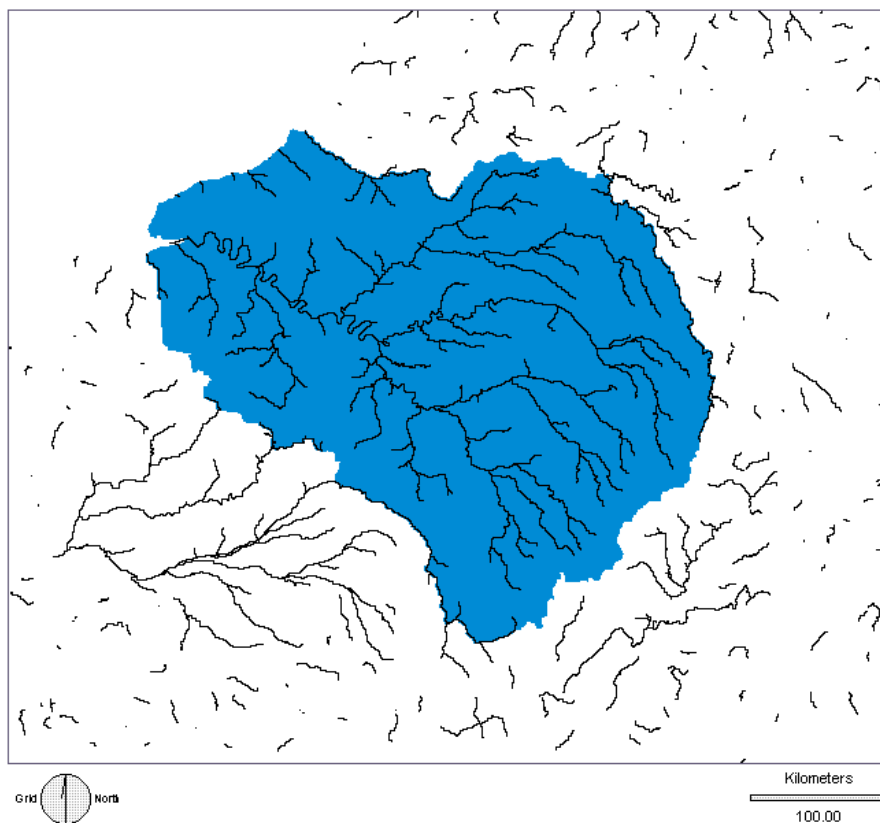


FIG. 8: *Domaine d'étude*

être utilisées pour construire la structure du modèle. A ce stade de l'étude, on utilise une méthode automatique de construction du maillage. Ce programme, SIGMOD, a été développé par Golaz-Cavazzi (1995), et permet de fournir un fichier utilisable comme fichier d'entrée dans GEOCOU.

Les mailles initiales du M.N.A. sont regroupées afin d'obtenir un réseau de mailles carrées emboîtées. Ces regroupements sont soumis à des critères topologiques (respect des règles de voisinage : 4 mailles d'ordre n ne pourront être regroupées que si elles n'ont pas de voisines d'ordre $n-1$), et à des critères hydrologiques (limitation de la taille des mailles en rivière, regroupements autorisés à l'intérieur d'un même sous-bassin). En appliquant cette méthode au domaine d'étude (95390 mailles de 1 km^2), le nombre de mailles a été réduit à 35540 mailles (figure 9). Pour les mailles situées en rivière, il n'y a pas eu de regroupement.

SIGMOD fournit aussi un fichier des temps de transfert individuels, calculés à partir des pentes, sur chacune des mailles du M.N.A. (figure 10). Le fichier obtenu sera directement utilisable par le module GEOCOU.

Géologie du domaine d'étude

Le modèle hydrologique distingue, d'une part une couche de surface, et d'autre part, une nombre variable d'aquifères. Afin de choisir les aquifères qui seront simulés dans le modèle, on a recouru à une base de données géologique, disponible à l'école des Mines, qui a été établie à partir d'une carte géologique au 1/1000000.

En superposant le maillage de la Seine et le maillage de la carte géologique, et en utilisant les possibilités du S.I.G., la géologie a été représentée sur chaque maille du domaine d'étude (figure 11). On en déduit le maillage de la couche souterraine dans la partie libre des aquifères (figure 12). Au niveau des terrains tertiaires, une structure multicouche sera envisagée.



FIG. 9: *Maillage de la zone d'étude*

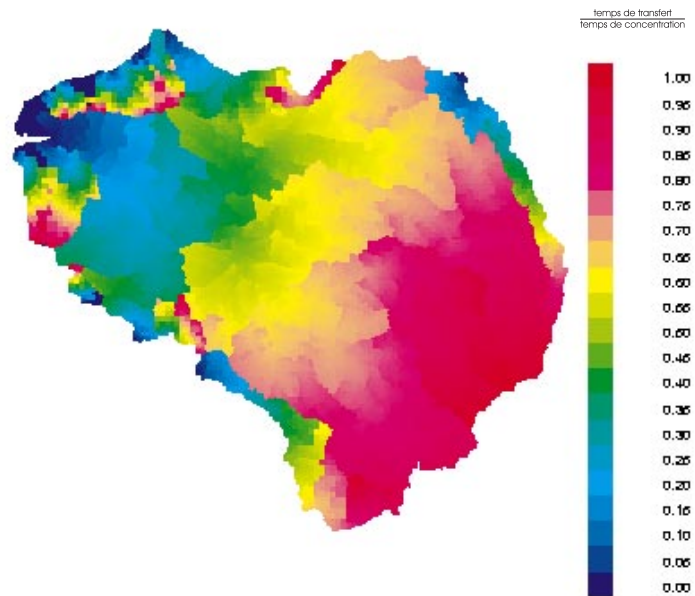


FIG. 10: *Zones isochrones*

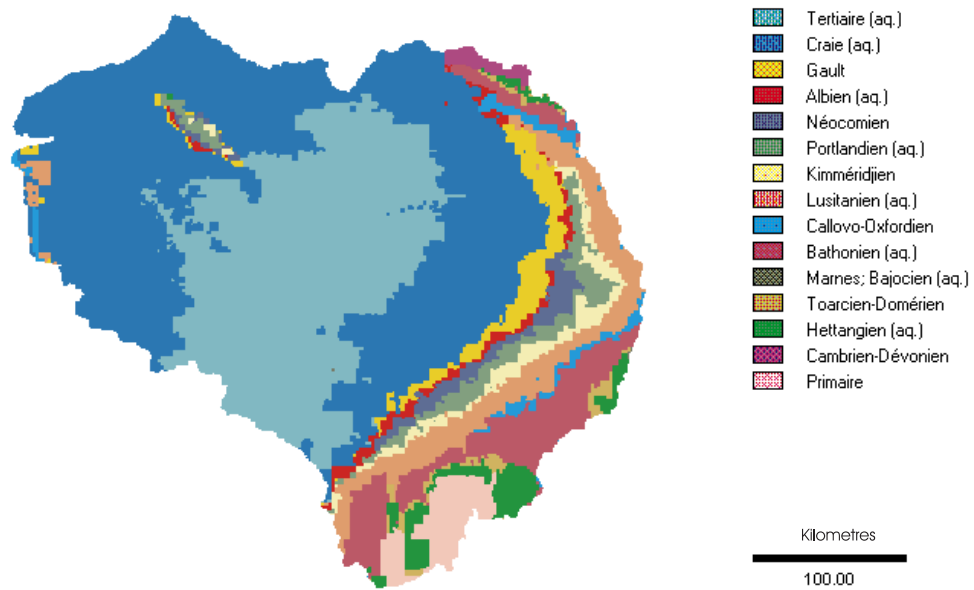


FIG. 11: *Base de données géologique*

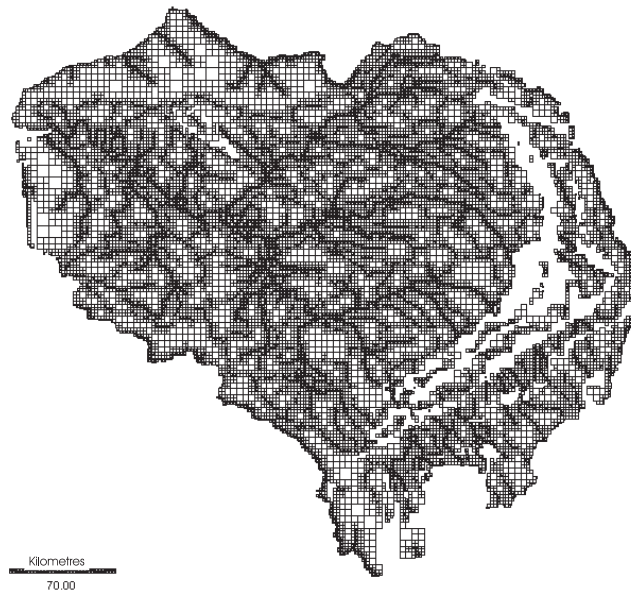


FIG. 12: *Maillage de la couche souterraine (partie libre des aquifères)*

3.3 Perspectives

Les données obtenues au cours de ce traitement (maillage, définition du réseau hydrographique, temps de transfert, définition de la géologie) sont nécessaires à la mise en oeuvre du Modèle Hydrologique Couplé (MODCOU). Néanmoins d'autres types de données sont nécessaires. 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 hydrodynamiques
- une base de données piézométriques

Références citées :

GOLAZ-CAVAZZI Catherine (1995) : Exploitation d'un modèle numérique de terrain pour l'aide à la mise en place d'un modèle hydrologique distribué, DEA UPMC, 75p.

LEBLOIS Etienne (1993) : De l'hydrologie avec le SIG raster IDRISI, Ecole Nationale du Génie rural des Eaux et Forêts, 75p.

LEDOUX Emmanuel (1980) : Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique, thèse de docteur ingénieur, ENSMP.

LEVASSOR André et LEDOUX Emmanuel (1993) : Newsam, un programme général de simulation des écoulements et des transport de matière dans les systèmes aquifères complexes. Notice d'utilisation, Centre d'informatique géologique, ENSMP, 182p.

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**