

UN SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE NUMÉRIQUE APPLIQUÉ A L'EAU (SIGNEAU)

M. RISSONS¹

RÉSUMÉ

Cet article présente le modèle SIGNEAU, outil ayant pour objectif l'organisation des données géographiques explicatives de l'hydrologie, en une base de données d'objets hydrologiques, dont la structure ramifiée et hiérarchique, est induite par le cheminement des écoulements superficiels.

¹Laboratoire d'Hydrologie et Modélisation-Université Montpellier II

INTRODUCTION

La nécessité d'évaluer l'impact de changements globaux dans les agrosystèmes et les écosystèmes, mais aussi les perturbations majeures telles que les incendies, crée de nouvelles exigences en matière de modélisation hydrologique.

Le succès de cette modélisation dépend de la capacité à appréhender les processus hydrologiques dans les différents compartiments du cycle de l'eau et à organiser les différents plans d'informations spatialisées en relation avec ces processus.

Cette hydrologie qui se veut plus explicative, mais qui est aussi plus complexe, peut être facilitée par une modélisation en deux étapes, séparant les « données », des « méthodes » les manipulant. La première partie constitue une préparation de la multitude des informations explicatives de l'hydrologie qu'il est nécessaire d'acquérir, d'analyser et de gérer. La seconde phase représente le travail de réflexion hydrologique à travers les mécanismes de transfert à modéliser. Ces deux parties présentent des problématiques bien distinctes, justifiant la dissociation. Elles ne sont toutefois pas totalement indépendantes, étant donné que ce sont les processus qui induisent le choix de variables pertinentes. La structure de l'information constitue une seconde dépendance.

Les mécanismes hydrologiques s'appliquent communément à des unités considérées comme homogènes, où les caractéristiques de sol, de végétation, de topographie et autres, peuvent être considérées uniformes ou suivant une loi simple. Il est par conséquent important d'organiser l'information selon ces entités, en associant à chacun des éléments, des paramètres pour prendre en compte la variabilité spatiale de données géographiques sur l'étendue de chacune de ces unités. Les éléments peuvent être également organisés ; (MARK, 1978) préconise l'utilisation d'une structure imposée par le processus étudié. Pour l'hydrologie de surface, cette structure doit être induite par l'écoulement superficiel qui, du fait des mécanismes morphogénétiques, est souvent en coïncidence avec l'hydrologie souterraine. L'organisation des entités selon le cheminement hydraulique est réalisable par des chaînages des éléments, qui peuvent être explicités par des codifications adéquates. La structuration des données précédemment expliquée permet en définitive la constitution d'une base de données d'objets hydrologiques ayant comme contenu informationnel celui des entités, et une structure imposée par le phénomène étudié ; (BAND, 1989) décrit un système d'information similaire.

Son modèle découpe l'espace en bassins versants et les codifie. Il constitue ensuite une base de données de bassins ayant une structure induite par le réseau hydrographique et contenant les descripteurs de ces entités. Cet article présente le modèle SIGNEAU, système d'information basé sur un découpage plus fin, et,

par conséquent, plus homogène et fonctionnel : les parcelles. L'extraction de ces éléments requiert celle d'autres entités (bassins versants, versants, éléments de versants).

Cette première étape d'une modélisation complexe permet une gestion simplifiée de l'information mais rend également possible l'utilisation de méthodologie informatique récente telle que le concept « objet » pour la modélisation hydrologique proprement dite constituant la seconde étape. La base constituée par la première partie est en définitive une base d'objets hydrologiques dont les éléments de base sont le bief et la parcelle. Ces entités ont été différenciées en raison de leurs comportements hydrauliques très distincts. L'utilisation d'une modélisation objet pour la seconde partie renforcera la dissociation en créant des classes d'objets spécifiques. Elle amènera à la constitution d'un modèle renfermant une collection de méthodes. La disponibilité ou non d'une information permettra de choisir le mécanisme à employer. Cette souplesse possible en raison de la structuration de l'information démontre aussi une relative indépendance des deux étapes « données » et « méthodes ».

Cette publication sera décomposée en deux parties principales :

- les méthodes d'extraction et de numérotation des unités ;
- la constitution de la base de données des entités.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Le modèle SIGNEAU a été développé dans le cadre du projet ALLEGRO (analyses locales et intégrées de la ressource en eau). Ce programme de recherches se situe dans la double problématique de l'évaluation des conséquences hydrologiques des changements dans les agrosystèmes et écosystèmes, et celle des changements globaux. Ce modèle a été appliqué sur le bassin versant d'une superficie de 125 km², d'un affluent de la rive droite du fleuve français de l'Hérault : la PEYNE.

Bien que le modèle ait été conçu en programmation classique, le concept objet (MEYER, 1991) a prévalu à la création de celui-ci. Ce principe est explicite dans les différentes méthodologies présentées ci-après. Les divers types d'entités possèdent des caractéristiques fonctionnelles communes qui permettent l'émergence d'un objet hydrologique élémentaire caractérisé par une donnée : le libellé de l'élément et une méthode : la numérotation de priorité à gauche.

L'objet bief hérite directement de cette classe à laquelle est adjointe une méthode d'acquisition spécifique. L'objet bassin versant constitue la classe supérieure des unités de paysages. Celle-ci possède une méthode d'acquisition et de numérotation héritée de la méthode de codification de l'objet hydrologique de base. Les autres entités héritent hiérarchiquement des propriétés et méthodes de la classe de rang supérieur. Par exemple, les éléments de versant sont extraits

selon la méthode d'acquisition du bassin versant à laquelle sont adjoints des traitements spécifiques, les parcelles sont codifiées selon la méthode de numérotation des éléments de versants.

Ce modèle permet à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) l'extraction du réseau hydrographique et le découpage de l'espace en différentes unités de paysages (bassins versants, versants rives gauche et rives droite, éléments des versants, parcelles). Les méthodes d'acquisition des toposéquences ont pour caractéristique commune la création d'entités hydrologiques qui, du point de vue de l'écoulement de surface, ont un seul aval et un seul amont. Les transferts latéraux sont rendus impossibles en raison de l'existence de barrières hydrauliques : les lignes de crêtes et lignes de pentes.

Des codifications adéquates permettent d'élaborer des liens hydrologiques entre les entités extraites. Ces liaisons expriment le sens d'écoulement supposé de l'eau de surface, ce sont des chaînages inter-entités (un bief s'écoule dans un autre bief, une parcelle ruisselle sur une autre parcelle) ou des chaînages extra-entités (une parcelle alimente un bief). Les numérotations mettent également en évidence les liens d'appartenance ou d'inclusion (une parcelle est incluse dans un élément de versant, qui appartient à un versant, lui-même faisant partie d'un bassin versant).

EXTRACTION ET NUMÉROTATION DES UNITÉS

RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE

La détermination du réseau hydrographique à partir d'un MNT peut être réalisée par deux groupes de méthodes : les méthodes morphologiques visant à caractériser une forme de vallée, les méthodes dynamiques cherchant à suivre le trajet que ferait une goutte d'eau ruisselant à la surface du sol (PEUCKER ET DOUGLAS 1975 ; O'CALLAGHAN ET MARK 1984 ; BAND 1986 ; TARBOTON *et al.* 1989). Les méthodes du premier groupe effectuent des analyses de voisinage ou des filtres pouvant être réalisés par un SIG. Cependant, ces techniques donnent un réseau hydrographique brut non satisfaisant. Les rivières détectées sont assez discontinues et ont le plus souvent une largeur supérieure à la maille du MNT.

Les méthodes du second groupe sont inspirées du modèle physique de ruissellement de l'eau sur un relief. Elles consistent à suivre la plus grande pente entre une maille et ses huit voisines. La mise en oeuvre par un SIG est impossible. La technique adoptée procède en plusieurs étapes. La première consiste à calculer pour chaque maille du MNT, une direction de drainage codifiée de un à huit pour les huit directions possibles, le code zéro indiquant

l'existence d'un minimum local. La seconde étape consiste à traiter interactivement ces anomalies. Le calcul d'un fichier de surface de drainage s'effectue dans la troisième étape. Chaque maille contient la valeur de la surface qu'elle draine. Le réseau hydrographique est extrait à partir du calcul de la surface drainée, l'hypothèse sous-jacente est que la quantité d'eau s'écoulant en un point est proportionnelle à la surface drainée : le seuil, au-delà duquel un écoulement suffisamment concentré donne naissance à une rivière. Ces trois premières phases sont réalisées par le logiciel LAMONT (Logiciel d'Application de Modèles Numériques de Terrain) de (DEPRAETERE C, 1991) de l'ORSTOM.

La numérotation d'une rivière nécessite le fichier de surfaces drainées et le fichier de directions de drainage. Toutes les mailles du fichier de directions ayant une surface drainée supérieure ou égale à la surface seuil constituent des mailles rivière. Le réseau hydrographique, ainsi défini, peut être alors facilement parcouru puisque le sens de parcours est l'inverse du sens de drainage ou sens d'écoulement.

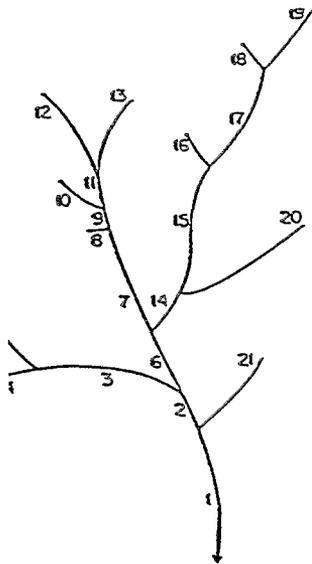
La codification choisie est la numérotation de « priorité à gauche » (SMART, 1970). Pour un réseau hydrographique possédant un exutoire unique, ce système de codage consiste à parcourir les berges de l'ensemble du réseau en partant de la rive droite de l'exutoire. Le réseau est décrit en parcourant un à un chacun des biefs, en montant sur la rive droite de leur confluence au point source et en redescendant par la rive gauche. La description complète du réseau s'achève au retour au point exutoire par la rive gauche. Cette méthode est appelée « priorité à gauche » car en chaque noeud où plusieurs biefs aboutissent, le premier le plus à gauche non numéroté est parcouru (le terme gauche correspond à la gauche d'une personne remontant le réseau puisque l'algorithme de parcours est montant). Dans cette technique, chaque tronçon est parcouru deux fois, une fois en montant, une fois en descendant. Une liste des numéros de biefs parcourus permet de décrire la structure arborescente de la rivière (figure 1).

Cette codification a des propriétés fort intéressantes en hydrologie :

- extraction d'un sous réseau ;
- détermination du bief aval à un bief donné ;
- détermination des biefs amont à un bief donné ;
- reconstitution de la classification de Strahler de 1964.

BASSINS VERSANTS ET VERSANTS RIVES GAUCHE ET DROITE

La délimitation de bassins versants peut être réalisée également par les deux groupes de méthodes déjà citées. Les méthodes dynamiques utilisent les informations du fichier de drainage qui indiquent les sens d'écoulement de maille en maille. Plusieurs algorithmes peuvent être envisagés.



Liste des biefs.

1 2 3 4 4 5 5 3 6 7 8 8 9 10 10 11 12 12 13 13 11 9 7 14 15 16 16 17 18 18 15
17 15 20 20 14 6 2 21 21 1

Extraction d'un sous réseau.

ex: 7 8 8 9 10 10 11 12 12 13 13 11 9 7

Détermination du bief aval à un bief donné.

ex: 17 18 18 19 19 17 15 15 a pour bief aval 17

Détermination des biefs amonts à un bief donné.

ex: 14 15 16 16 17 18 18 19 17 15 20 20 14 14 a pour bief amont 15 et 20

Figure 1

Numérotation de « priorité à gauche »

La technique adoptée a été mise au point pour ce travail de structuration de l'information. Elle est une des applications de la numérotation de « priorité à gauche » du réseau hydrographique (explicitée ci-dessus), un bassin étant décrit par la rivière de seuil de surface égale à l'unité qu'il engendre. Les bassins versants, sont déterminés et numérotés en même temps que la numérotation du réseau hydrographique (figure 2).

A l'exutoire principal, l'algorithme de délimitation du bassin versant ayant ce même exutoire est exécuté. Tout le bassin est codé 1. Lorsque l'algorithme de numérotation des cours d'eau détermine une bifurcation, il parcourt la première rivière la plus à gauche et relance la délimitation du bassin versant engendré par ce bief, ayant pour exutoire la première maille après ramification. Toute la surface est codée 2, et ainsi de suite. Un bassin a le même numéro que le bief qu'il engendre.

En même temps que cours d'eau et bassins versants sont numérotés, la technique de « priorité à gauche » permet de réaliser aisément la distinction entre rive gauche et rive droite. Le cours d'eau constitue le séparateur entre rives.

Deux cas sont distingués :

- le bassin versant est à l'extrémité d'un sous-réseau. Par conséquent, il n'est pas traversé entièrement par un cours d'eau. Il est nécessaire d'achever virtuellement le ruisseau jusqu'à atteindre la limite du bassin,

une source fictive. La continuité du cours d'eau est réalisée en recherchant la ligne de plus grande surface drainée. En utilisant la méthode de « priorité à gauche », gauche et droite sont connus à chaque instant. Jusqu'à ce que le réseau hydrographique de surface seuil unitaire (bassin versant) atteigne le point source, toutes les mailles parcourues ont le code droit, ensuite elles ont le code gauche ;

- le bassin versant est découpé en deux par un cours d'eau. La technique est la même que précédemment, si ce n'est qu'il n'est pas nécessaire de terminer le ruisseau.



Figure 2
Réseau hydrographique et bassins versants

ÉLÉMENTS DE VERSANTS (FIGURE 3)

Les éléments de versants sont obtenus par morcellement d'un versant suivant des lignes de crêtes. L'algorithme de découpage est similaire à celui adopté pour les bassins. Le nombre d'éléments de versants au sein d'un versant est fixé par un paramètre de découpage : la surface minimale imposée pour l'obtention de ces nouvelles entités.

Les éléments de versants sont codifiés selon leur ordre d'apparition. Toutes les mailles d'un élément ont le code de cet élément. A cette numérotation absolue des unités correspond une autre codification plus hydrologique. Cette dernière permet de savoir qu'un élément appartient à tel bassin versant, à tel versant, et à tel ordre d'apparition au sein d'un versant. Cette numérotation est obtenue simplement par superposition spatiale des différents plans énumérés ci-dessus. La correspondance entre les deux codifications est réalisée par l'intermédiaire d'une table déterminée lors de la superposition.

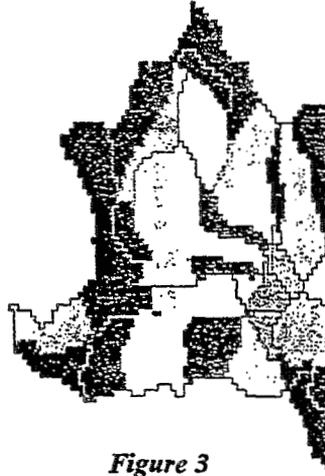


Figure 3
Eléments de versants

PARCELLES (FIGURE 4)

La parcelle est l'unité hydrologique la plus élémentaire proposée par le modèle SIGNEAU. Les parcelles sont obtenues par découpage des éléments de versant en tranches de distances d'écoulement à la rivière. Les parcelles sont codifiées selon le même principe que celui utilisé pour les éléments de versants : numérotation absolue et table de correspondance pour l'obtention de la codification hydrologique des unités. Les plans spatiaux codifiés nécessaires sont les deux couches d'informations citées précédemment.



Figure 4
Parcelles

STRUCTURE DE LA BASE DE DONNÉES

L'accès aux informations contenues dans la base de données d'objets nécessite différents codes numériques dont chacun constitue un niveau hiérarchique.

La liste de numéros de bief obtenue par la méthode de « priorité à gauche » décrit la structure arborescente du réseau hydrographique. Le code de bief constitue la principale clé d'information de la base de données. Du fait que le bassin versant et le bief qu'il engendre ont même numéro, ce seul nombre permet d'accéder à tous les renseignements relatifs à ces deux entités. Il a été montré que la numérotation utilisée engendrait une liste où chaque bief y est inscrit deux fois, une première fois en montant sur la rive droite, une seconde fois en descendant sur la rive gauche. Cette remarque met en évidence la seconde clé implicite de la base, l'accès aux versants rives gauche ou droite défini par la succession de la première clé. Par conséquent, lorsqu'un numéro est rencontré pour la première fois, il décrit le bief et le versant rive droite en sa totalité. Lorsqu'un numéro est rencontré pour la seconde fois, il est relatif au versant rive gauche uniquement, le bief étant décrit une fois pour toute à la première rencontre.

Une seconde clé explicite permet d'accéder aux informations relatives aux éléments de versants classés de l'aval vers l'amont d'un versant donné choisi par la première clé et la seconde clé implicite.

Une troisième permet d'accéder aux données des parcelles classées également selon le sens inverse de l'écoulement.

LES DONNÉES HYDROLOGIQUES

Les plans codifiés, réseau hydrographique, bassins versants, versants rives gauche et droite, éléments de versants et parcelles définissent les plans spatiaux de structures des toposéquences. La superposition de couches d'informations hydrologiques à ces plans permet de compléter le contenu informationnel de chaque entité. Chaque objet est renseigné par une valeur numérique caractérisant la variabilité spatiale de l'information considérée pour la superficie de l'unité.

Sans connaître toutes les variables spatiales pertinentes au regard du fonctionnement hydrologique en relation avec les processus qui doivent être modélisés, il est possible de définir trois types de données différentes. Leur nature diverse est prise en compte pour remplir la base lors de la superposition des informations aux plans structurants.

Le premier type de données est connu sur toute l'étendue géographique. Il ne présente pas de problème particulier. C'est le cas, par exemple, de la couverture végétale obtenue par image satellite. Chaque maille a souvent une valeur. Une

entité étant le regroupement de plusieurs mailles, elle doit posséder une ou deux valeurs pour prendre en compte la variabilité spatiale de ce paramètre. Il est nécessaire par conséquent de réaliser un traitement qui permette une intégration non brutale afin de ne pas perdre d'information. Par exemple, le calcul de la moyenne et de la variance permet de schématiser la répartition d'une variable au sein d'une unité de faible superficie. L'intégration ne peut qu'occasionner des pertes d'information limitées dues à une densité de l'information trop grande au regard du découpage. En effet, le modèle dispose de plusieurs paramètres qui permettent l'ajustement de la densité de l'information au découpage de l'espace. Ce sont la surface seuil du réseau hydrographique, la surface minimale des éléments de versants et le nombre maximum de parcelles au sein d'un élément de versant. L'adéquation entre le découpage et la densité constitue un avantage de première importance dans ce modèle d'organisation.

Le second type d'informations est connu en certains points sans que l'extrapolation soit envisageable pour toute l'étendue spatiale. C'est le cas classique de données issues de postes et points de mesure telles que le débit d'une rivière ou les résultats d'analyses chimiques. Les objets contenant l'information, possèdent un code permettant d'indiquer la présence et la nature dans ces entités de points de mesure. Ces unités contiennent également un nom de fichier, rendant possible l'accès aux différentes valeurs de mesures en ce point.

Le troisième type de données est connu en certains points avec extrapolation possible. L'interpolation permet de renseigner tout objet, c'est le cas de la pluie par exemple en utilisant les aires d'influences de la méthode des polygones de Thiessen. Chaque entité possède comme précédemment un code et un nom de fichier pour ce mode de représentation.

ENCHAÎNEMENT AMONT-AVAL (FIGURE 6)

Les codifications adoptées permettent de reconstituer les sens d'écoulement des différentes unités. Ce paragraphe expose pour les éléments de base qui serviront au modèle hydrologique : bief et parcelle, l'interprétation des codes pour la connaissance des chaînages amont-aval.

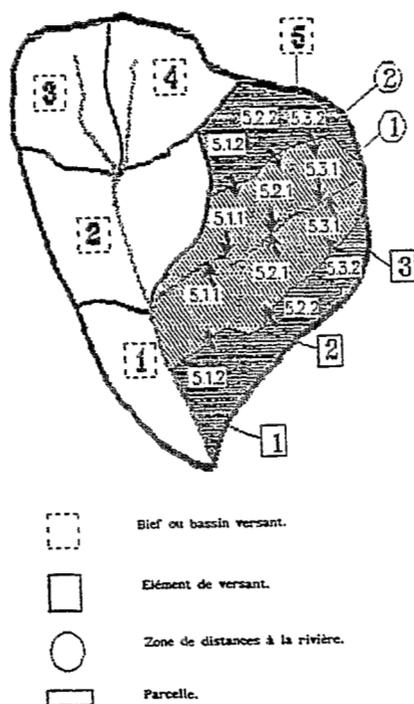
Chaque parcelle a un numéro composé de trois clés. La dernière clé exprime, au sein d'un même élément de versant, l'enchaînement des parcelles qui le constituent. Les parcelles 5-1-(2) se déversent dans les parcelles 5-1-(1). Les parcelles les plus à l'aval des éléments de versants se déversent dans les biefs. La parcelle 5-1-(1) se déverse dans le bief 5.

La seconde clé exprime l'enchaînement des éléments de versants de l'aval vers l'amont pour un versant. A l'exutoire local d'un bassin versant, les eaux provenant des éléments de versants rives gauche et droite, 1 puis 2, puis 3 sont

observées suivant cette chronologie d'apparition. A l'exutoire du bassin versant 5, les eaux provenant des parcelles 5-(1)-1 gauche et droite puis 5-(2)-1 gauche et droite... seront observables.

La première clé fixe finalement la superposition des hydrogrammes des biefs. La liste de structure du réseau hydrographique représente la suite ramifiée des enchaînements amont-aval des tronçons de rivière. Pour la liste de structure suivante 1 2 3 4 4 2 5 5 1, le bief 3 se déverse dans le bief 2, ce dernier se déverse dans le bief 1.

Le modèle SIGNEAU décrit dans cet article est perfectible. La principale remarque pouvant lui être adressée est l'utilisation d'un MNT raster pour la détermination du réseau hydrographique et des limites de bassins versants, éléments de versants, parcelles. Un MNT vecteur implique en théorie une précision accrue des contours. Ce mode autorise une densité d'informations altimétriques en relation avec les caractéristiques topographiques. Les méthodologies d'acquisition de la rivière et des bassins versants à partir de ces MNT sont récentes (MOORE et GRAYSON, 1991). Ces derniers décrivent un découpage des bassins selon les courbes de niveaux et des tubes de courants dont les intersections des lignes définissent les éléments de base du modèle TAPE-C. Les



parcelles de SIGNEAU sont leur équivalent, les courbes de niveaux étant représentées par des distances de cheminement d'une goutte d'eau jusqu'à la rivière et les tubes de courant par les éléments de versants hydrauliquement indépendants. La différence de fonctionnalité des deux modèles, conçus à la même époque, explique le choix du mode raster pour l'un et vecteur pour l'autre. Le modèle SIGNEAU a pour objectif la structuration de l'information. La création de la base d'objets hydrologiques impose le recours à des opérations de superposition de plans d'information qui sont simples et rapides en mode raster. Les algorithmes sont complexes et nécessitent une topologie parfaite en mode vecteur.

Le seuil de la surface drainée permet, par seuillage du réseau hydrographique, de définir ce dernier. Une surface seuil trop élevée entraîne une rivière trop réduite, *a contrario* une surface trop petite, un chevelu trop important. Il a été montré que c'est le réseau hydrographique, squelette de la structuration, qui impose principalement la division de l'espace. Par conséquent, le seuil qui le définit devient le paramètre prépondérant du découpage. Normalement, ce seuil est le même partout. Néanmoins, il est possible de prendre une surface plus petite pour des zones où une étude locale a été réalisée, et une surface plus grande pour les zones où l'information spatiale est rare. Cette modulation du découpage en fonction de la densité de l'information est un point important qui permet de sauvegarder la précision des données sans devoir imposer une intégration brutale. En réalité, le seuil est d'abord calculé pour l'ensemble du bassin versant, puis est ajusté au niveau local pour prendre en compte la variation de répartition des données. Pour la PEYNE, deux bassins versants locaux ont fait l'objet d'études relativement fines, il serait préjudiciable de perdre une partie de l'information recueillie sous prétexte que le découpage imposé par le modèle crée des parcelles trop grandes, imposant une intégration violente des données.

Le modèle SIGNEAU permet l'extraction automatique et rapide de plans, tels que le réseau hydrographique, les bassins versants, les versants, les éléments de versants, les parcelles et le calcul de leurs descripteurs (longueur et pente de bief, aire, périmètre, ...) à partir d'un MNT. Cet outil réalise les calculs de nombreuses autres couches d'informations (distance à l'exutoire, distance à la rivière, aire d'influence de la méthode de Thiessen, ...). Ce programme accomplit la codification du réseau hydrographique et des unités de paysages pour expliciter les liens physiques exprimant les relations d'inclusion, de hiérarchie et le sens d'écoulement de l'eau de surface des éléments les uns par rapport aux autres. L'outil effectue la superposition de couches d'informations explicatives de l'hydrologie qui sont originellement en mode de représentation vecteur (position poste pluviométrique, ...) ou raster (pédologie, géologie, végétation) aux plans des unités de paysages afin de renseigner chaque entité. Ce logiciel

aboutit finalement, après avoir exécuté les traitements précédents, à la création d'une base de données d'objets hydrologiques ayant comme contenu informationnel celui des entités. La base a une structure adaptée au phénomène étudié ; elle est imposée par l'écoulement superficiel à travers l'enchaînement des unités.

L'information structurée rappelée succinctement permet de simplifier considérablement la gestion des données géographiques. L'organisation de l'information par la constitution d'une base hydrologique d'objets constitue la première étape pour la conception d'un modèle hydrologique spatialisé déterministe. La seconde étape est la modélisation des mécanismes hydrologiques, c'est-à-dire, la programmation des méthodes au sens objet, s'appliquant aux données des unités. Structuration de l'information en une base de données d'objets organisée selon le fonctionnement hydrologique et modélisation objet sont deux étapes qui devraient simplifier et rendre possible une modélisation très complexe.

BIBLIOGRAPHIE

BAND L.F., 1986. Topographic partition of watersheds with digital elevation models. *Water Resources Research*. Vol 22, no 1, 15-24.

BAND L.F., 1989. A terrain based watershed information system. *Hydrological processes*. Vol 3, 151-162.

DEPRAETERE C., 1991. LAMONT Logiciel d'Application des Modèles Numériques de Terrain. Notice OVNIH #4 du laboratoire d'hydrologie de l'ORSTOM, 146 p.

MARK D.M., 1978. Concept of data structure for digital terrain models. Paper presented at Digital Terrain Models Symposium. Am. Soc Of Photogramm. St Louis, Mo.

MEYER B., 1991. Conception et programmation objet. Inter Edition Paris.

MOORE I.D., AND GRAYSON R.B., 1991. Terrain-based catchment partitioning and runoff prediction using vector elevation data. *Water Resources Research*. Vol 27, no 6, 1177-1191.

- O'CALLAGHAN J.F. AND MARK D.M., 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. Computer graphics and image processing. Vol 28, 323-344.
- PEUCKER T.K. AND DOUGLAS D.H., 1975. Detection of surface specific point by local parallel processing of discrete terrain elevation data. Computer graphics and image processing. Vol 4, 375-387.
- SMART J.S., 1970. Use of topologic information in processing data for channel networks. Water Resources Research. Vol 6, no 3, 932-936.
- STRALHER A.N., 1964. Quantitive geomorphology of drainage basins and channel networks. Handbook of applied hydrology, Ven Te Chow. Mc Graw Hill, New York.
- TARBOTON D.G., BRAS R.L., AND TURBE I., RODRIGUEZ I., 1989. The analysis of river basins and channel networks using digital terrain data. Report 326, Ralph M. Parsons Laboratory, Mass. Inst. Of Techno., Cambridge.

ANNEXE

Le Logiciel SIGNEAU comprenant 12000 lignes d'instructions, est composé de trois modules exécutables écrits en Turbo Pascal. Il fonctionne sur IBM PC et compatibles sous système d'exploitation MS DOS. Il requiert 640 Ko de mémoire vive et au moins 10 Mo de mémoire de masse libre. Un écran couleur est indispensable. Les cartes graphiques supportées sont les cartes Hercules, CGA, EGA et VGA. SIGNEAU calcule 64 fichiers dont 24 plans d'informations ayant la même taille que le fichier d'origine (MNT).