

ATHYS: atelier hydrologique spatialisé

CH. BOUVIER, F. DELCLAUX & A. CRESPIY

Orstom, Laboratoire d'Hydrologie, BP 5045, F-34032 Montpellier Cedex, France

Résumé ATHYS représente un environnement convivial à vocation hydrologique, destiné à l'analyse et à l'application de modèles spatialisés. Il comprend un module de traitement et de visualisation de données hydro-pluviométriques, un module de traitement et de visualisation de données géographiques et un catalogue de modèles. ATHYS est développé avec le langage Tcl/Tk et le générateur Xf, pour fonctionner sur station de travail. Au terme d'une première année consacrée à construire un outil opérationnel sur la base de l'existant, ATHYS devrait rapidement évoluer vers une structure plus modulaire et plus puissante, notamment en ce qui concerne l'intégration des modèles hydrologiques.

ATHYS: hydrological spatial computing tool kit

Abstract ATHYS is a tool kit for the application of space-distributed models in hydrology. It includes three separate parts: a processor-viewer of the rainfall-runoff data, a processor-viewer of the geographic data, and a list of ready-to-use hydrological models. ATHYS can be installed on any work station, and was developed using the Tcl/Tk language and Xf interface, which ensures user-friendly software. During the first year of development, the objectives were mainly to integrate existing software into the ATHYS environment. Latter, ATHYS is supposed to work with a model generator that the hydrologist would use to build his own model.

INTRODUCTION

Ceux d'entre nous qui ont connu Monsieur Rodier restent très impressionnés par sa capacité à mémoriser d'innombrables observations acquises sur toutes sortes de bassins, pour en comprendre leur fonctionnement ... sans l'aide d'un quelconque ordinateur! Ceci nous semble bien difficile à concevoir maintenant, en partie sans doute parce que les objectifs de l'hydrologie se sont faits plus ambitieux, et que l'on ne peut plus y répondre sans l'aide d'un outillage conséquent de logiciels.

Dans ce contexte, développer une recherche de qualité, c'est bien souvent s'appuyer sur une base informatique puissante. Il n'est pas rare en effet de consacrer plus de la moitié de son temps à l'utilisation, voire au développement, de divers logiciels. On attend bien sûr que ceux-ci soient réalisés avec le plus grand soin. D'autre part, pour une diffusion efficace auprès de partenaires ne disposant pas nécessairement de compétences informatiques poussées, ces logiciels se doivent d'être particulièrement faciles à mettre en oeuvre, et c'est peut être ce que l'on oublie le plus fréquemment.

Si la plupart des besoins hydrologiques courants sont relativement bien couverts par les logiciels existant actuellement (et l'Orstom a toujours veillé à y contribuer), certains

domaines restent encore insuffisamment pourvus, tout en faisant l'objet d'une forte demande. C'est le cas en particulier de la modélisation distribuée.

ATHYS (ATelier HYdrologique Spatialisé) est né du besoin de définir et de concevoir un outil opérationnel pour la mise en oeuvre des modèles hydrologiques spatialisés. Ce type de modèle nécessite en effet la manipulation d'un grand nombre de données, aussi bien hydro-pluviométriques que géographiques, et requiert l'utilisation de logiciels fonctionnant jusque là indépendamment les uns des autres, avec des structures parfois très différentes.

Le premier objectif d'ATHYS est donc de rassembler et d'uniformiser. Les possibilités de visualisation étant naturellement importantes pour préparer les données nécessaires aux modèles et interpréter leurs résultats, le second objectif d'ATHYS est de fournir dans ce domaine un support puissant. Enfin, ATHYS prétend être un outil ouvert, capable d'intégrer toute sorte de développement futur, programmé en C ou en fortran, sans autre travail que la réalisation de l'interface de présentation, et la transmission des options de traitement et des résultats par voie interne.

Lors du démarrage d'ATHYS, une des questions posées était de savoir comment se positionner par rapport aux SIG, et il existe effectivement un certain nombre de tentatives récentes consistant à intégrer des modèles hydrologiques dans un SIG (Chairat & Delleur, 1993; Romanowicz *et al.*, 1993). Cette solution ne nous a pas semblé convenable pour plusieurs raisons:

- le maniement d'un SIG, dont l'hydrologue n'utilisera finalement qu'un nombre limité de fonctionnalités, représente un investissement extrêmement lourd;
- intégrer un modèle dans un SIG, c'est imposer à l'utilisateur potentiel le choix de ce SIG, qui n'est pas nécessairement celui qu'il a l'habitude d'utiliser, s'il en utilise un; c'est aussi se lier à une structure fermée, dont on contrôle difficilement l'évolution;
- les SIG restent généralement mal adaptés à la gestion des données « très dynamiques », comme les pluies et les écoulements. De plus, un certain nombre de techniques de modélisation: optimisation, analyse de sensibilité ne figurent pas dans les SIG.

S'il est effectivement intéressant d'utiliser en hydrologie quelques fonctionnalités des SIG, il nous paraît finalement plus rationnel de transférer ces fonctionnalités vers un environnement hydrologique, que le contraire.

ATHYS: les principes de base

Les principes de base qui ont conduit à la réalisation d'ATHYS sont donc:

- (a) environnement hydrologique dédié à la modélisation distribuée incluant une série de modèles, la visualisation des données hydro-pluviométriques et géographiques, l'interpolation spatiale (spline et krigeage); la génération et le traitement de MNT, qui ne présentent pas une nature typiquement hydrologique, ont également été intégrés dans ATHYS, compte tenu de leur rôle central dans la modélisation distribuée;
- (b) environnement logiciel totalement séparé des SIG, des outils de traitement d'image et des bases de données. Tous les traitements d'images élaborés seront réalisés à l'extérieur d'ATHYS, qui comprendra seulement un ensemble d'opérations élémen-

- taires, et assurera l'importation et l'exportation des structures de fichiers standard utilisés par l'ensemble des outils géographiques dédiés (format TIFF, DXF, ...);
- (c) environnement informatique implanté sur station de travail Sun, IBM, HP ...;
 - (d) environnement modulaire facilitant l'intégration des applications existantes et les possibilités de développement ultérieur. Les interfaces utilisateur sont développés avec le langage Tcl/Tk et le générateur Xf (Delmas, 1993; Ousterhout, 1993).

ATHYS: présentation des modules

ATHYS est constitué de trois parties principales: un pré-processeur de données hydrologiques, un pré-processeur de données géographiques et un catalogue de modèles. La Fig. 1 donne un exemple de présentation des menus d'ATHYS: le menu principal est à l'arrière plan (on ne voit que la colonne correspondant au catalogue de modèles), les deux autres plans correspondent à l'activation du modèle MERCEDES et de l'item « Paramètres du modèle ».

Le pré-processeur hydrologique

Un premier module est constitué de quatre rubriques principales, réunissant l'ensemble des opérations nécessaires à la constitution des épisodes hydro-pluviométriques:

- L'importation et l'exportation des données pluviométriques et hydrométriques: les formats internes utilisés par ATHYS sont les formats ASCII d'exportation de Pluviom et de Hydrom. Plusieurs programmes sont disponibles pour échanger ces formats avec d'autres formats courants, ou avec un format que peut définir l'utilisateur (par positionnement des variables dans chaque enregistrement).
- La fusion des données de pluies et de débits dans un fichier unique, dans lequel chaque ligne correspond à un pas-de-temps donné, fixé par l'utilisateur. Chaque bloc d'enregistrement correspond à une année, avec un mode d'écriture condensé pour réduire l'encombrement de ces fichiers.
- La création d'épisodes à partir du fichier précédent; chaque épisode est défini par ses dates de début et de fin, qui peuvent être fixées manuellement ou automatiquement: dans ce dernier cas, l'utilisateur peut demander un découpage systématique de l'année, et conserver tous les épisodes associés à des seuils de hauteur de pluie et de débit maximum fixés à volonté.
- La correction des valeurs contenues dans les épisodes, pour une période et pour un ou plusieurs postes définis par l'utilisateur: les opérateurs disponibles sont +, -, *, / et mise en lacune.

Ce module dispose en outre d'une fonction de visualisation, comprenant divers réglages: choix de l'épisode, des postes à représenter, des échelles de temps, de pluies et de débits. Les principales caractéristiques hydro-pluviométriques de l'épisode sont calculées automatiquement par rapport à ce qui est visualisé; figurent également plusieurs fonctions d'impression. La Fig. 2 montre un exemple de visualisation dans lequel figurent trois hyétogrammes et deux hydrogrammes (calculés et observés dans le même cadre) au pas-de-temps journalier.

Un deuxième module intègre la génération de grilles spatiales pluviométriques à partir de données ponctuelles par interpolation à base de fonctions spline ou krigeage

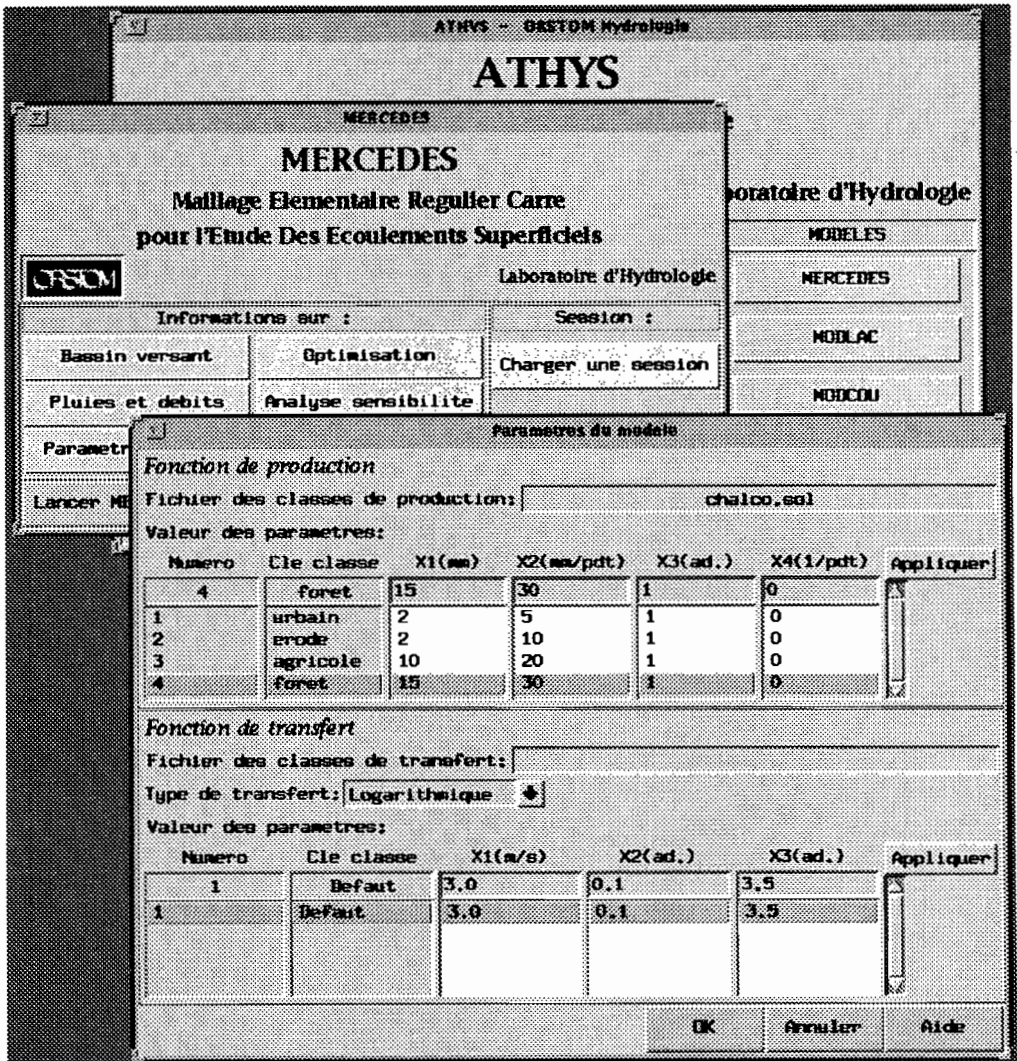


Fig. 1 Exemples d'écrans de menus ATHYS.

(Delclaux & Thauvin, 1991). C'est le programme SPATIAL qui a été directement intégré dans ATHYS.

Le pré-processeur géographique

Le pré-processeur géographique comporte trois rubriques principales:

- échange de formats, permettant de convertir les fichiers aux différents formats standard (Tiff, Sunraster, PCX, DXF, ...) et aux différents formats Orstom (Planete, Lamont, ...);

- opérations de base sur les images, avec différents programmes pour modifier ou traiter les images: modifier dimensions ou orientation de l'image, recoder les valeurs, masquer, opérations algébriques sur une ou plusieurs images, squelettisation, statistiques sur image, ...;
- traitement de MNT, constitué essentiellement par le portage des programmes réalisés par Depraetere (1991). Ce module possède cinq fonctionnalités principales: création de MNT à partir de courbes de niveau et/ou de semis de points - par interpolation barycentrique ou polynomiale, création des fichiers dérivés du MNT (pentes, orientations, drainage, convexités, ...), correction du modèle de drainage avec option pour forcer le drainage, création des fichiers dérivés du modèle de drainage (distances à l'exutoire, bassins versants, superficies drainées), et divers utilitaires à application hydrologique.

Un visualiseur de données cartographiques, VICAIR, (VISualisation de CARtes et d'INformation Raster) affiche les informations spatialisées nécessaires au modèle (voir la Fig. 2): cartes raster, vecteur et point. VICAIR, développé à partir du visualiseur intégré à la version Public Domain GRASS/Tcl/Tk réalisée par le bureau d'étude canadien LAS, intègre un gestionnaire de couches -au sens où chaque couche d'information peut être visualisée ou supprimée indépendamment des autres- permettant la superposition 2D des cartes et la vérification de leur cohérence. Bien qu'utilisant en interne la structure de données des fichiers GRASS, VICAIR permet d'accéder à d'autres formats de fichiers tels que TIFF, GRASS ASCII, DXF,

Les modèles hydrologiques

Trois modèles sont intégrés ou en cours d'intégration dans ATHYS:

(a) MERCEDES (Bouvier, 1994; Bouvier *et al.*, 1994) est un modèle spatialisé conceptuel opérant sur la base de mailles carrées régulières, pour représenter les écoulements superficiels. Deux versions de Mercedes sont actuellement disponibles et intégrées dans ATHYS:

- la première repose sur le principe d'additivité des contributions des différentes mailles pour restituer l'hydrogramme résultant en un ou plusieurs points-exutoires. Cette version comprend quatre paramètres de production, simulant le réservoir sol (hauteur du stock STO et loi de vidange ds), et deux types de pertes continues (soustractives INF et/ou multiplicatives $COEF$). La contribution au ruissellement de chaque maille est transférée à l'exutoire en suivant la trajectoire définie par les directions de drainage, et en considérant que la vitesse V_m de transfert sur chaque maille est fixée à l'aide de deux paramètres, V_o et α , et reliée à la pente p de la maille par l'expression:

$$V_m = V_o \cdot p^\alpha \quad (1)$$

On en déduit un temps de propagation T_m jusqu'à l'exutoire, et l'on réalise ensuite l'étalement dans le temps de cette contribution, à l'aide d'un stockage de type réservoir linéaire. Le coefficient K_m de ce réservoir est lié au temps de transfert T_m par une relation logarithmique, dans laquelle intervient un troisième paramètre de transfert, K_o :

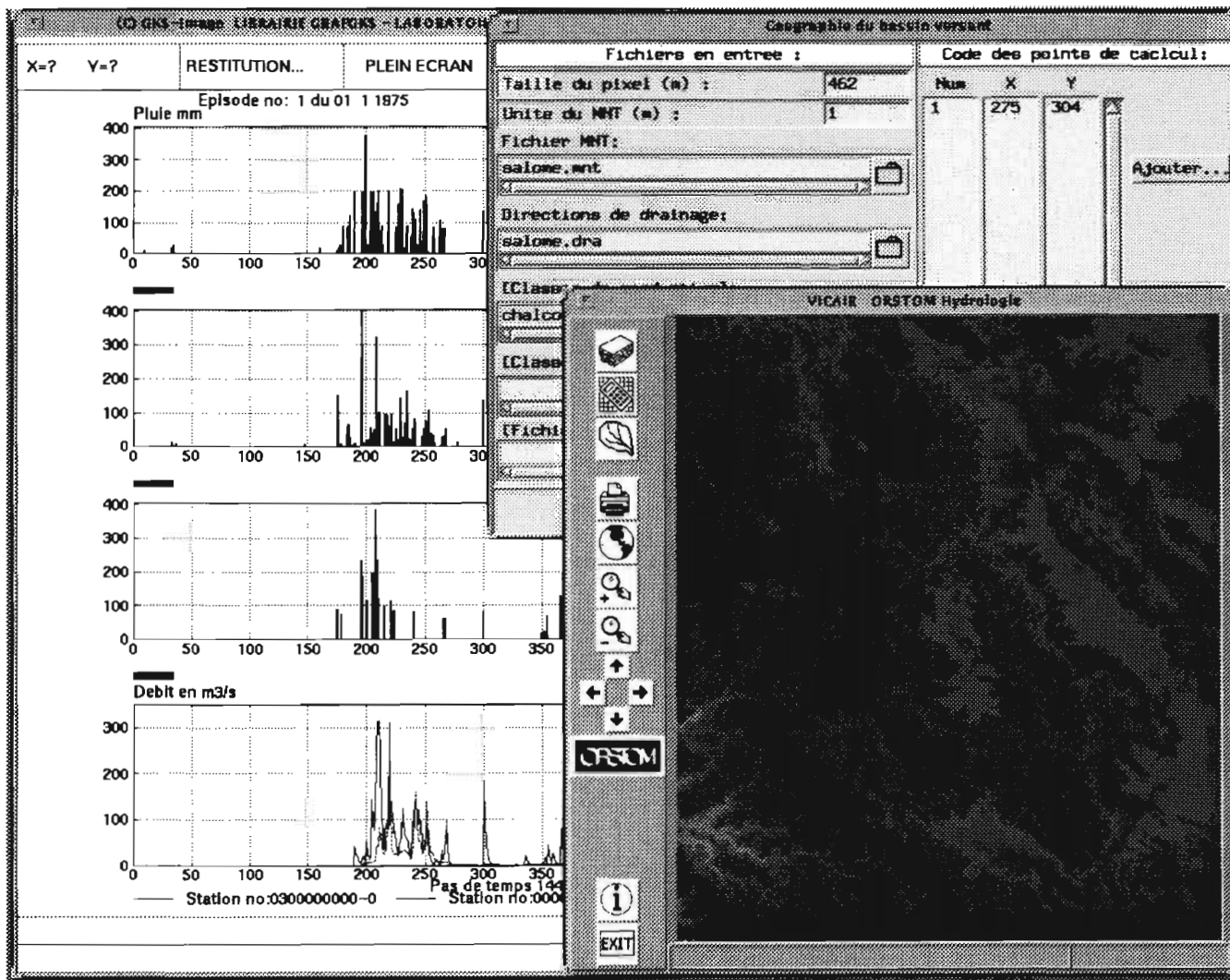


Fig. 2 Exemples de visualisations dans ATHYS.

$$K_m = K_o \cdot \ln(T_m) \quad (2)$$

L'étalement est donc fonction (logarithmique) de la position de la maille sur le bassin. On obtient finalement l'hydrogramme résultant en sommant les hydrogrammes élémentaires des contributions des différentes mailles pour les différentes impulsions de pluie:

- la seconde version, plus complète, prend en compte les interactions des différentes mailles. Contrairement à la première version, le volume transité par une maille dépend des apports pluvieux et des apports des mailles amont, et décrit les états intermédiaires du bassin, pour chaque temps de calcul et pour chaque maille. Les paramètres de production sont analogues à ceux de la première version, mais peuvent décrire la redistribution des pertes sur la trajectoire, l'introduction de retenues dans le système. Le transfert est basé sur la même expression de la vitesse, combinée avec un étalement réalisé sur les N mailles parcourues au cours d'un pas-de-temps de calcul: un réservoir linéaire répartit les volumes sur chaque maille en fonction d'un paramètre K_m lié à la distance d_{\max} parcourue au cours du pas-de-temps de calcul:

$$K_m = K_o \cdot \ln(d_{\max}) \quad (3)$$

Enfin, cette version propose également une modélisation des défluences, par l'intermédiaire de plusieurs couches de drainage hiérarchisées et communiquant entre elles en fonction de seuils débimétriques que l'utilisateur doit fixer. On présente plus loin un exemple de traitement réalisé avec cette version de Mercedes.

Les principes d'utilisation de Mercedes se veulent simples et faciles à mettre en oeuvre. Ils ont été testés jusqu'à présent sur une gamme assez large de bassins versants: bassins urbains de quelques hectares à une dizaine de km^2 , bassins naturels montagneux de 30-100 km^2 , grands bassins de plusieurs milliers de km^2 .

Les deux modèles suivants, MODLAC et MODCOU sont plus anciens et mieux connus. Ils sont résumés brièvement:

- (b) MODLAC (Girard, 1982) est un modèle conceptuel distribué adapté aux bassins versants ruraux équipés ou non de retenues. Il permet, soit la modélisation du comportement du bassin, soit la simulation de scénarios d'aménagement. Il fonctionne à des échelles de temps journalières pour des bassins-versants supérieurs à 100 km^2 . La couche de surface est discrétisée en mailles carrées de taille variable en fonction de la densité de l'information spatiale. Ce modèle intègre treize fonctions de production, déterminées par le croisement d'informations diverses, qui répartissent l'eau entre écoulement de surface, infiltration, stockage dans le sol et évapotranspiration. Le transfert est effectué en tenant compte de la durée du trajet de l'eau d'une maille jusqu'à l'exutoire du bassin.
- (c) MODCOU a été développé sur des principes identiques à ceux de MODLAC: même découpage spatial, mêmes échelles, mêmes fonctions de production et de transfert pour la couche sol. De plus, ce modèle est complété par un modèle souterrain caractérisé par une fonction de transfert dans la zone non saturée, une fonction de transfert souterrain simulant l'écoulement au sein des aquifères par la loi de Darcy et une fonction d'échange nappe-rivière.

ATHYS: les perspectives

Démarré en janvier 1995, le projet ATHYS a cherché en priorité à intégrer les fonctions, programmes et modèles existants. Cette première phase a permis de valoriser les différents logiciels jusque-là épars, et de consolider la réflexion concernant l'avenir du projet.

L'utilisation de l'existant présente des limites évidentes: un certain nombre de programmes doivent impérativement être rafraîchis, voire transformés. C'est surtout dans le cas des modèles que doit évoluer l'architecture d'ATHYS: intégrer ces modèles tels qu'ils existent actuellement représente d'abord un travail lourd pour développer l'interface utilisateur, conduit ensuite à intégrer plusieurs fois les mêmes fonctions (optimisation, sensibilité qui lorsqu'elles existent, sont des procédures liées au modèle), et trace enfin un cadre totalement figé par modèle.

On souhaiterait au contraire utiliser toutes les combinaisons possibles (aussi bien au niveau des structures spatialisées que des concepts) pour « fabriquer » un modèle. A ces constituants fondamentaux du modèle – structures et concepts, on doit pouvoir adjoindre les fonctionnalités destinées à faciliter l'analyse et l'application: procédures d'optimisation ou de sensibilité, calculs d'incertitudes. Tout cela suppose que les différents constituants du modèle soient compatibles entre eux, et interchangeables:

- En ce qui concerne les structures, le problème peut se ramener finalement à numéroter un certain nombre d'objets (mailles carrées ou triangulaires, régulières ou irrégulières, ou plus généralement objet de forme quelconque) auxquels il faut savoir associer diverses caractéristiques (position, surface, longueur, sol, végétation, relief, ...) et des liens de l'amont vers l'aval. Dans le cas de mailles carrées régulières par exemple, on accède assez facilement à ces diverses données. Dans d'autres cas, certaines fonctions simples des SIG (agrégation de pixels sur des zones de limites connues par exemple) suffiront à obtenir ces caractéristiques. Dans quelques autres cas enfin, la définition des objets et de leurs attributs requiert certaines fonctions relationnelles des SIG que l'on envisage pas d'intégrer dans ATHYS: si par exemple, l'utilisateur veut construire l'intersection (géométrique) de deux attributs non numériques (e.g. types de sols et de végétation), le recours à un SIG relationnel est alors inévitable.
- En ce qui concerne les concepts, il s'agit d'écrire les modules de production et/ou de transfert en respectant une programmation standard. Deux options sont actuellement analysées et comparées: la première consiste à fournir à l'utilisateur un catalogue de ces modules interchangeableables, mais figés, programmés dans un ou éventuellement plusieurs langages (fortran, C), et se référant à des variables imposées (variables climatiques – pluies, températures, ensoleillement, ..., ou variables géographiques – pentes, sols, végétation, ...) que l'on utilisera ou pas; la seconde correspond à la réalisation d'une interface de programmation simplifiée, permettant tout à la fois d'écrire les concepts de production et de transfert en disposant des opérateurs algébriques courants, mais également de définir les variables et paramètres que l'on souhaite utiliser de façon beaucoup plus souple.

ATHYS: un exemple d'application

Le traitement présenté dans ce qui suit concerne la caractérisation des risques d'inondations, sur une zone pilote de la ville de Ouagadougou (Bouvier & Hingray, 1995). A Ouagadougou comme dans de nombreuses villes d'Afrique de l'Ouest, les submersions sont fréquentes et dues à la conjonction de plusieurs facteurs: relief peu marqué, insuffisance des infrastructures de drainage et de leur entretien, rapidité de l'extension urbaine. Les écoulements sont d'abord canalisés par les collecteurs et les voiries, puis, dans les cas critiques, se répandent dans le tissu urbain, dans des directions qui correspondent alors à la topographie naturelle des lieux. La modélisation des écoulements repose sur cette dualité artificielle/naturelle des directions de l'écoulement, et sur l'utilisation du modèle Mercedes dans sa version multicouches.

Un premier traitement consiste à modifier les directions naturelles du drainage (déduites du MNT) en fonction du réseau des collecteurs et des voiries. On applique au modèle de drainage initial la fonction d'ATHYS de drainage forcé: les directions à forcer sont matérialisées par un réseau linéaire (digitalisé ou extrait d'une image); ce réseau est décomposé par le programme en segments; on interroge le MNT pour connaître les altitudes des extrémités de chaque segment, la différence définissant alors le sens de drainage; on corrige alors les directions sur ce segment en fonction du sens indiqué par le programme. On a représenté sur la Fig. 3 les réseaux hydrographiques (calculés à partir du MNT par seuillage sur la superficie drainée en amont) naturels et modifiés en fonction des voiries et des collecteurs.

MERCEDES a ensuite été appliqué à la zone pilote avec une pluie uniforme correspondant à une période de retour $T = 50$ ans. Les paramètres de production et de transfert ont également été uniformisés sur la zone, notamment $INF = 5 \text{ mm h}^{-1}$, $V_o = 1 \text{ m s}^{-1}$, le calcul ayant été réalisé pour des pas-de-temps de 10 s, avec des mailles de 10 m de côté.

On a considéré que les capacités d'évacuation étaient égales à $20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ pour les collecteurs, et $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ pour les voiries. Lorsque ces seuils sont dépassés, le débit excédentaire est alors transféré en suivant les directions induites par la topographie naturelle. Dans cette représentation, le bassin versant n'est plus défini de façon univoque, mais varie au contraire en fonction des différents débordements ou captages locaux, gérés sans que l'utilisateur ait à intervenir: c'est naturellement un autre avantage de la méthode. La Fig. 4 représente les débits maximaux calculés hors du réseau défini par les collecteurs et les voiries, et donne une appréciation visuelle des flux et de leur impact sur les zones urbanisées.

CONCLUSIONS

Le développement d'ATHYS intervient alors que l'usage des modèles spatialisés tend à se généraliser en hydrologie. Longtemps dissuasive, la mise en place de ces modèles bénéficie depuis quelques années des progrès réalisés en matière de logiciels géographiques: SIG, traitement de MNT et d'imagerie satellitaire. ATHYS propose un couplage original entre ces logiciels et les modèles hydrologiques, dans lequel l'hydrologie reste prépondérante et l'investissement dans les logiciels géographiques limité.

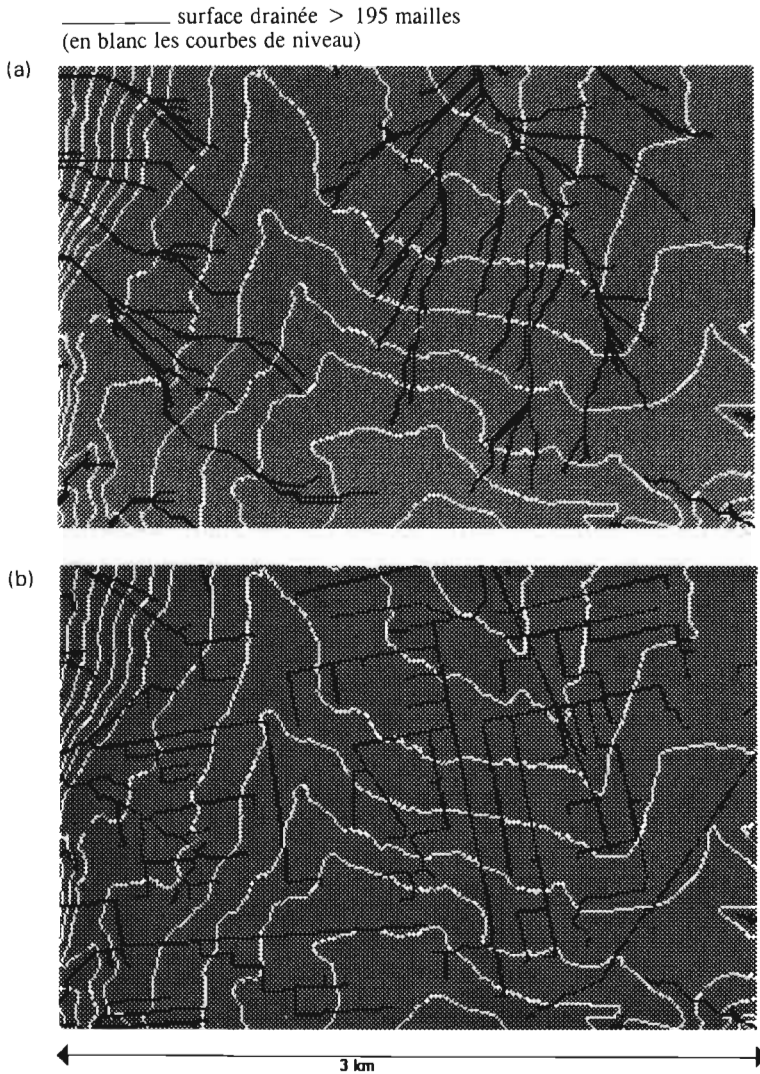


Fig. 3 Rectification du modèle de drainage en fonction des voiries et des collecteurs: (a) drainage induit par la topographie naturelle (b) drainage corrigé en fonction des voiries et des collecteurs.

L'exemple concernant les inondations urbaines, entièrement traité par ATHYS, montre ce que peuvent apporter les modèles spatialisés par rapport à la simple restitution de valeurs calculées à un exutoire: c'est d'abord la possibilité d'obtenir une description multi-temporelle des champs d'écoulements, restituant avec réalisme le fonctionnement interne du système. Outre l'hydrologie, ce type de représentation intéresse tous les phénomènes liés aux écoulements, transport de sédiments ou de polluants par exemple. Enfin, c'est non seulement au niveau de l'information que l'on gagne, mais aussi au niveau de sa présentation et de sa compréhension par des non-spécialistes.

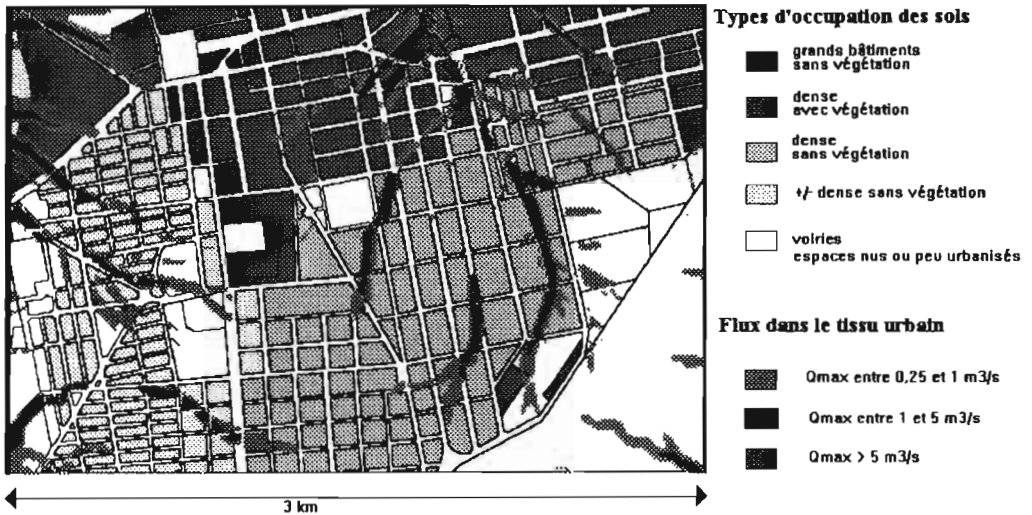


Fig. 4 Champs des débits maximaux consécutifs à une pluie uniforme $T = 50$ ans.

Ceci étant, les modèles spatialisés sont encore loin d'avoir apporté tous les progrès escomptés en hydrologie. De multiples études, basées sur des expérimentations plus élaborées, restent à développer pour aboutir à une représentation satisfaisante des phénomènes. Là encore, par sa capacité à faciliter l'application de modèles existants comme à en construire de nouveaux, ATHYS devrait apparaître comme la plate-forme idéale pour l'analyse de l'espace hydrologique.

REFERENCES

- Bouvier, C. (1994) MERCEDES: principes du modèle et notice d'utilisation. Rapport interne Orstom.
- Bouvier, C., Fuentes, G. & Dominguez, R. (1994) MERCEDES: un modèle hydrologique d'analyse et de prévision de crues en milieu hétérogène. In: *Comptes-rendus des 23èmes Journées de la SHF Crues et inondations* (Nîmes, septembre 1994), 257-260.
- Bouvier, C. & Hingray, B. (1995) Une méthode hydro-géographique pour la caractérisation du risque pluvial en milieu urbain. In: *Hydrologie urbaine et modélisation spatialisée*. Mémoire de DEA de B. Hingray, Université de Montpellier 2.
- Chairat, S. & Delleur, J. W. (1993) Integrating a physically based hydrological model with GRASS. In: *Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management* (Proc. HydroGIS93 Conf., Vienna, April 1993) (ed. par K. Kovar & H. P. Nachtnebel), 143-150. IAHS Publ. no. 211.
- Delclaux, F. & Thauvin, V. (1991) SPATIAL, chaîne de traitement de données spatialisées – spline, variogramme, krigeage: méthodes et manuel utilisateur. Rapport interne, Orstom Laboratoire d'Hydrologie.
- Delmas, S. (1993) XF: design and implementation of a programming environment for interactive construction of graphical user interfaces. Berlin.
- Depraetere, C. (1991) *DEMIURGE 2.0 Chaîne de production et de traitement de MNT. Manuel*, tome 3: LAMONT. Coll. Logorstom, Orstom.
- Girard, G. (1982). Modélisation des écoulements de surface sur des bassins hydrologiques équipés de réservoirs: modèle MODLAC. *Cah. Orstom, sér. Hydrol.* 19(2), 55-72.
- Ousterhout, J. K. (1993) Tcl and the Tk toolkit. Draft report, University of California, Berkeley.
- Romanowicz, R., Beven, K., Freer, J. & Moore, R. (1993) TOPMODEL as an application module within WIS. In: *Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management* (Proc. HydroGIS93 Conf., Vienna, April 1993) (ed. par K. Kovar & H. P. Nachtnebel), 211-223. IAHS Publ. no. 211.