

Modélisation des écoulements de surface sur des bassins hydrologiques équipés de réservoirs

Modèle MODLAC

G. GIRARD
Directeur de Recherches

SOMMAIRE

1. *Introduction*
2. *Objectifs du modèle Modlac*
3. *Utilisation du modèle*
4. *Conception du modèle*
 - 4.1. *Organisation du modèle*
 - 4.1.1. le programme GEOCOU
 - 4.1.2. le programme MODLAC
 - 4.1.2.1. Production
 - 4.1.2.2. Bilan sur retenue amont
 - 4.1.2.3. Bilan sur retenue aval
 - 4.1.2.4. Produit obtenu
 - 4.2. Double structure des bassins versants avec retenue
 - 4.3. Bilan des lacs amont ou lac d'ordre 1
 - 4.4. Bilan des lacs ou retenue d'ordre 2
5. *Fonction des différents membres du programme MODLAC*
 - 5.1. *Sous-programmes particuliers*
6. *Conclusion*

RÉSUMÉ

L'auteur présente une modélisation des écoulements de surface sur un ensemble de bassins versants hydrographiques comportant des aménagements de stockage d'eau en surface et de transferts d'eau en nombre variable au cours du temps.

A partir des données pluviométriques et climatologiques, des règles de gestion des aménagements (débits réservés, débits turbinés, débits dérivés et colatures), le modèle déterministe à discrétisation spatiale, (mailles carrées emboîtées), assure une simulation spatio-temporelle des écoulements d'eau et des divers stocks d'eau compte tenu de l'historique des aménagements sur ces bassins.

Calé sur la période historique, ce qui exige déjà un contrôle et une critique des données mises en jeu, le modèle permet d'étudier l'influence des modifications envisagées concernant la structure des aménagements mais aussi de reconstituer les écoulements spatio-temporels naturels qui auraient pu être observés en l'absence de tout ou partie des aménagements.

SUMMARY : Modelling the surface runoff on hydrological basins equipped with reservoirs MODLAC model

The author presents a modelization of water flows on a group of hydrographic watersheds having developments for the storage of surface water and for waters transfers. The number of the developments is time dependent.

The model uses data of rain gauges and weather informations as well as the managing rules of these developments (controlled flows, turbinated flows, derivated flows and collected flows). It is a deterministic model with spatial discretization square mesh grids and it ensures a spatio-time dependent simulation of water flows and other water storages. It considers also the history of all developments on these catchment areas.

The calibration on the historical period for the model requires a control and a critical analysis of all involved data. Studies can be done on the influence of modifications concerning the organization of the developments and the model allows the reconstitution of naturel flows which are spatio-time dependent and which could have been observed in lack of wholly or partly developments.

1. INTRODUCTION

Sans une connaissance suffisante de la ressource, il ne peut être question de planification exorbitante ou de gestion rationnelle et efficace de l'eau dans des pays qui sont aux prises avec des problèmes de pénuries liés à la disponibilité de la ressource en eau.

Cette connaissance implique d'une manière indispensable que l'on dispose :

- a) d'un inventaire de la ressource naturelle, c'est-à-dire de la connaissance de sa distribution dans l'espace, indépendamment de son utilisation actuelle en quantité puis en qualité ;
- b) de la connaissance de sa distribution dans le temps avec la même condition ;
- c) de la connaissance exacte de l'évolution de la ressource actuellement disponible, compte tenu des aménagements hydrauliques réalisés à une date donnée (stockage en surface, dérivation, irrigation, colatures...).

Si la mesure in situ a la propriété d'être une évaluation exacte, elle a par contre le désavantage d'être une opération effectuée en un point et en un moment donné. Si l'on veut connaître l'importance de la ressource et son évolution dans le temps, il faut réaliser des mesures en plusieurs points et ces mesures doivent être faites de façon continue. Dans le cas de la planification et de la gestion de la ressource en eau, cette méthode présente un inconvénient majeur puisqu'elle n'est garante ni de ce qui a été mesuré ni de ce qui est mesuré.

Si l'on veut reconstituer ce qui n'a pas été mesuré, à certaines époques et en certains lieux, compte tenu de l'influence des aménagements hydrauliques de bassin sur les transferts, sur les utilisations et pertes, et prédire ce qui arrivera dans l'avenir, on doit nécessairement utiliser l'image de la ressource eau, c'est-à-dire avoir recours à un modèle mathématique hydrologique.

Loin d'éliminer la mesure, au contraire, le modèle en fait une utilisation plus rationnelle puisqu'il en est tributaire. La mesure des niveaux, des débits, permet de vérifier si le modèle est bien à l'image de la réalité physique qu'il veut représenter et si le comportement simulé de la ressource est, compte tenu des transferts et utilisations, bien conforme à la réalité présente et passée.

La ressource en eau est liée aux phénomènes physiques du cycle hydrologique et aux influences des aménagements de stockage de l'eau et des transferts avec utilisations. Le modèle qui prend en compte les phénomènes d'évapotranspiration, de ruissellement, d'infiltration, de percolation et d'écoulement en rivière, devra en plus prendre en compte les modifications dans le temps des stockages en surface, des échanges d'eau et des diverses utilisations par l'homme.

2. OBJECTIF DU MODÈLE MODLAC

Le modèle « MODLAC » de modélisation des écoulements sur un ensemble de bassins versants hydrographiques équipés ou non de retenues d'eau ou de lacs, présenté dans cet article, permet la simulation spatio-temporelle des débits et des niveaux d'eau sur cet ensemble de bassins en tenant compte de toute la masse d'informations antérieurement archivées, concernant les divers transferts et utilisations de l'eau à l'intérieur de ce système.

Le modèle, à partir des données pluviométriques et climatologiques observées au cours d'une période définie, des caractéristiques physiographiques de ces bassins, des caractéristiques temporelles et géométriques des aménagements hydrauliques de stockage et bien entendu des règles de gestion de ces aménagements (débits dérivés, débits réservés, débits de colatures) assurera une simulation complète de ce système de bassin naturel et modifié pour l'homme.

Le terme *mesure* présenté dans l'introduction englobe non seulement les mesures classiques en hydrologie (pluie, niveau et débits des cours d'eau) mais également les niveaux des retenues d'eau, les débits dérivés et les débits de colature.

Il va de soi que la connaissance des caractéristiques des équipements hydrauliques sur ces bassins au cours du temps est indispensable, ainsi que celle des données de gestion de ces aménagements, pour obtenir du modèle des résultats conformes à la réalité.

Un des premiers objectifs de ce modèle est de mettre à la disposition des Services d'exploitation des réseaux de mesures (réseau pluviométrique, réseau hydrométrique, gestionnaire des eaux superficielles) un outil mathématique susceptible de réaliser un contrôle efficace de la qualité de chacune des séries chronologiques de mesures réalisées en divers points d'un même bassin versant ou à proximité (pluviométrie, débit, niveau d'eau des réservoirs), ainsi qu'un contrôle de la compatibilité à chaque pas de temps entre ces diverses observations pour des points précis de ces bassins versants.

Ces contrôles seront d'autant plus efficaces que les mesures précises continues ou non seront effectuées en un plus grand nombre de points et que le modèle, dont le haut degré de fiabilité a été reconnu antérieurement, fournira des résultats tangibles intégrant à la fois toutes les données d'observations et la connaissance exacte du système hydrologique en fonctionnement.

Le second objectif de ce modèle est celui d'être utilisable directement par un Organisme d'aménagement régional pour étudier l'influence des modifications de la structure des aménagements hydrauliques amont sur le fonctionnement des aménagements situés en aval (stockage avec régularisation, dérivation, etc.) en comptabilisant les défaillances compte tenu des règles de gestion établies.

D'autres objectifs peuvent être atteints :

Dans le cas d'un bassin versant particulièrement bien équipé, cet outil va permettre de reconstituer, en tous points du bassin ou parties de ce bassin, les écoulements naturels qui se seraient produits en l'absence d'aménagements ou d'une partie seulement de ceux-ci.

Un tel outil présente à l'heure actuelle un avantage très sérieux, particulièrement pour l'étude des bassins pour lesquels les séries chronologiques de débits ne sont pas homogènes par suite des influences sur les débits des aménagements hydrauliques successifs situés sur ceux-ci.

3. UTILISATION DU MODÈLE MODLAC

La première application de ce modèle MODLAC est la simulation des écoulements en tous points d'un bassin versant du Nord-Est du Brésil, sur une période de 11 années au cours de laquelle de nombreuses retenues (açudes) ont été créées et pour lesquelles des règles de gestion avaient été fixées.

L'étude est faite sur le bassin versant du Rio Acarau dans le cadre d'une étude associée ORSTOM-SUDÈNE *Influence des retenues sur le régime hydrologique et évaluation des superficies en eau à des dates connues*. Cette étude fait suite aux résultats obtenus dès 1965 sur les bassins du Val Jaguaribe en ce qui concerne l'accentuation du déficit de la ressource eau en période de sécheresse due à la présence des retenues en amont.

Dans une première étape, l'étude par modèle consiste à évaluer sur des grandes mailles carrées et sur les bassins hydrographiques la valeur de la superficie totale en eau des retenues et la surface des plans d'eau des plus grandes retenues, cela à chacune des dates définies et correspondant aux dates de passage du satellite Landsat. Le but ultime est de comparer les valeurs obtenues aux valeurs des superficies en eau obtenues par traitement de l'image Landsat.

Dans une seconde étape, une fois le modèle correctement calé sur toute la période intensive de mesures correspondant à la création des aménagements hydro-agricoles, le modèle procèdera aux simulations des écoulements sur ce bassin, dans des cas extrêmes d'aménagements :

- aucune retenue sur le bassin pour toute la période de simulation,
- équipement permanent depuis le début de la simulation à la fin correspondant à un équipement identique à celui existant en 1980.

Le bassin de Acarau de 11 550 km² comprend deux sous-bassins de 11 360 et 196 km² respectivement. On dénombre sur ce bassin 297 retenues de tête de bassin dont le volume total stockable atteint 59 404 000 m³. Onze de ces retenues ont une capacité supérieure à 1 million de m³.

En aval de ces 297 retenues, on trouve 19 retenues disposées sur le réseau hydrographique d'une capacité totale de 1 236 millions de m³. L'écoulement annuel naturel varie de 50 à 570 mm. L'écoulement actuel est réduit de 20 à 50% selon les aménagements réalisés.

4. CONCEPTION DU MODÈLE MODLAC

La structure de base de ce modèle, appelé MODLAC, est identique à celle du modèle intégré pluie-eau de surface-eau souterraine, développé en 1979 lors d'une collaboration franco-qubécoise entre l'Institut National de la Recherche Scientifique du Québec (I.N.R.S.-Eau), l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris (G.I.G.-Fontainebleau) et l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM-Paris) - (G. GIRARD *et al.*, 1979).

Le principe du modèle repose sur la représentation conceptuelle des différents maillons du cycle terrestre de l'eau traduisant la relation pluie-débit sur un certain nombre de cellules de base qualifiées de zones homogènes élémentaires.

L'espace superficiel du bassin ou du groupe de bassins est découpé systématiquement en mailles carrées emboîtées, d'autant plus petites que la densité de l'information y est spatialement plus importante. C'est le principe de la discrétisation spatiale.

Le cycle de l'eau est constitué de nombreux mécanismes complexes ayant des inter-actions les uns avec les autres. La caractéristique fondamentale du modèle est de décomposer la schématisation du système hydrologique en étapes indépendantes dont les résultats sont contrôlables séparément. On réunit ainsi à la fois les avantages évidents d'une simulation globale d'un système hydrologique et les possibilités de vérification de la validité de certains mécanismes internes souvent traités séparément autrefois, car ils relèvent de disciplines distincts dans l'étude des sciences de l'eau.

4.1. ORGANISATION GÉNÉRALE

Le modèle MODLAC considère un système hydrologique ouvert dont les entrées sont les précipitations sous forme de pluie ou eau de fonte de neige, les transferts d'eau de surface de l'extérieur vers l'intérieur du système et dont les sorties sont les écoulements aux exutoires des bassins versants, les écoulements par dérivation de l'intérieur vers l'extérieur du bassin, les pertes totales ou partielles des eaux destinées, à l'intérieur du système, aux irrigations, à l'alimentation humaine, etc. et les pertes par évaporation des sols et plans d'eau et par évapotranspiration de la végétation.

A chaque pas de calcul, le modèle assure la compatibilité absolue entre l'eau stockée dans les diverses retenues, l'eau utilisée pour l'irrigation, l'eau disponible pour les écoulements à destination de l'extérieur du système.

L'ensemble du modèle MODLAC est articulé en deux programmes écrits en langage Fortran et destinés à opérer séquentiellement :

- le programme GEOCOU ;
- le programme MODLAC.

4.1.1. Le programme GEOCOU

Le programme GEOCOU, identique au programme GEOCOU du modèle couplé ou modèle intégré pluie-eau de surface-eau souterraine, organise, en fonction des données physiographiques et de drainage, les informations caractérisant la discrétisation spatiale du milieu superficiel en l'état naturel et les positions relatives de ces éléments discrets, puis va constituer l'arbre de drainage (schéma d'arborescence du réseau hydrographique d'écoulement) de chacun des bassins versants et des sous-bassins de calcul.

La discrétisation initiale est constituée par un réseau de mailles carrées de côté $8a$ formant une grille de travail, pour le repérage ultérieur dans le plan, de largeur et de hauteur exprimées en nombre de mailles. Cette grille est numérotée à partir de la maille en haut et à gauche, dans le sens de la gauche vers la droite et de haut en bas. Localement ce maillage peut être subdivisé en sous-maillages de côté $4a$, $2a$ ou a mais en respectant une décroissance progressive ou, inversement, simplifié selon une croissance progressive (de a à $8a$ au maximum),

Cette subdivision s'explique :

- par le besoin de mieux représenter la forme des bassins versants et sous-bassins,
- par le besoin d'individualiser correctement chacun des aménagements hydrauliques du réseau hydrographique,
- par le souci d'utiliser toute l'information spatialement connue et très souvent irrégulièrement distribuée.

Le produit résultant de cette subdivision, limité au domaine d'étude, fera l'objet d'une numérotation nouvelle et chaque maille sera repérée dans la première grille ou schéma-type.

De plus, à chacune de ces mailles sera attribuée une direction unique de drainage choisie parmi les huit directions possibles selon le sens d'écoulement naturel observable d'après les cartes topographiques. Les mailles exutoires des bassins auront une direction de vidange conventionnelle.

Enfin pour chacune des mailles, le pourcentage de zones à caractéristiques homogènes du point de vue production d'écoulement et définies à partir des cartes de la végétation naturelle, de géologie et pédologie, sera relevé.

Le réseau de drainage de chacun des bassins versants se classe en deux catégories. On distingue :

- le réseau hydrographique principal qui assure le transfert d'eau en écoulement superficiel entre les retenues,
- le réseau secondaire qui peut drainer des zones amont ayant au plus un seul éventail de retenues. Le bilan en eau de ces retenues s'effectue à partir des apports naturels du bassin puisqu'il n'y a aucune autre retenue en amont. Aucun prélèvement n'est d'ailleurs effectué sur ces retenues.

En résumé, le système hydrologique se trouve être fractionné, d'une part, en bassins versants individualisés dont les exutoires symbolisent le pied de chaque arborescence du réseau hydrographique et, d'autre part, en sous-bassins versants délimitant soit un sous-bassin naturel d'écoulement, soit une zone ayant une ou plusieurs retenues disposées en parallèle. Chaque sous-bassin de calcul ayant pour exutoire normal une des mailles du réseau hydrographique principal appelée maille *rivière* se compose de l'ensemble des mailles additionnelles non rivière qui, ajoutées aux bassins des mailles rivières à l'amont immédiat, forment le nouveau bassin (Fig. 1).

4.1.2. Le programme MODLAC

Le programme MODLAC réalise trois opérations essentielles en séquence pour obtenir les débits d'écoulement en un certain nombre de points fixés des bassins (pied du déversoir des retenues en série et en parallèle, stations hydrométriques, arrivées des conduites de transfert d'eau prélevée) ou choisis au préalable ainsi que les niveaux d'eau dans les retenues, cela en fonction du temps bien entendu.

4.1.2.1. La première de ces opérations réalise le calcul, en fonction du pas de temps des données pluviométriques et pour chaque maille du domaine superficiel, de la lame d'eau produite et destinée à l'écoulement. Auparavant la production d'eau, à chaque pas de temps, pour chacune des zones homogènes soumises à l'influence de chacune des zones pluviométriques, avait été évaluée.

Selon les caractéristiques régionales du régime des précipitations et le réseau de postes de mesure disponibles, il est formé des ensembles de mailles de surface constituant chacun une zone pluviométrique homogène recevant la même précipitation introduite pour des pas de temps réguliers.

Le bilan hydrique est établi, suivant ce même pas de temps, pour chaque type du complexe sol-végétation y compris pour un plan d'eau théorique et pour chaque zone pluviométrique, à partir de la lame d'eau précipitée P , de l'évapotranspiration potentielle ETP , régionale ou locale, et de l'état du stock en eau R dans le réservoir sol suivant le schéma de la figure 2.

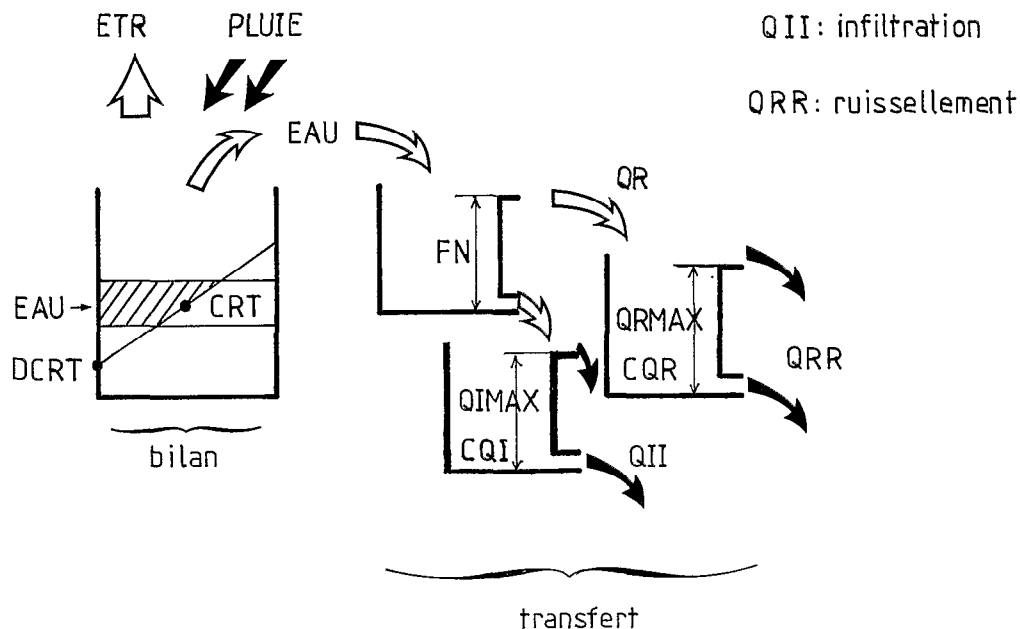
La capacité maximale de ce réservoir sol caractérise l'amplitude maximale de variation du stock en eau du sol au cours du cycle annuel, c'est-à-dire la quantité totale d'eau utilisable par la végétation compte tenu, bien entendu, des possibilités de stockage de ces complexes sol-végétation.

La quantité, EAU , disponible après évaporation est finalement répartie en une quantité infiltrée QII , et une quantité ruisselée QRR , dont la somme $QII + QRR = QIR$ représente la lame d'eau disponible pour chacun de ces complexes après avoir été modulée par les deux réservoirs.

Enfin, selon les participations de chacun de ces complexes en superficie, l'écoulement issu de chaque maille du réseau superficiel est évalué à chaque pas de temps.



Fig. 1. — Bassin Acarau (Brésil) organisation du drainage



$$\begin{aligned}
 RMAX &= 2(CRT - DCRT) + DCRT \\
 RBA &= \max(DCRT, R) - DCRT \\
 RHA &= \min(R + P, RMAX) - DCRT \\
 DR &= \max(0, RHA - RBA) \\
 EAU &= \max(RP - RMAX, 0) + DR(2RBA + DR)/(4(CRT - DCRT)) \\
 QI &= \min(EAU, FN) \\
 QR &= \max(0, EAU - QI) \\
 ETR &= \min(R + P - EAU, ETP) \\
 R &= R + P - EAU - ETR
 \end{aligned}$$

Fig. 2. — Schéma de principe de la fonction production type « sol »

4.1.2.2. La seconde de ces opérations réalise au niveau des sous-bassins de ruissellement le transfert de l'écoulement issu de chacune des mailles par la méthode d'isochronisme à l'exutoire du sous-bassin en tenant compte du bilan en eau pour chacune des retenues situées en parallèle du sous-bassin. Il est admis l'existence d'une seule retenue par maille ou d'une retenue composite en cas de présence de retenues semblables par leur profondeur.

Chaque retenue étant définie par ses caractéristiques surface et volume, présentées en annexe 1 - paragraphe 2, le bilan est effectué en tenant compte de la variation de la superficie du plan d'eau de la retenue, des pertes par évaporation directe du plan d'eau et des apports pluviométriques directs, de la variation de la superficie du bassin versant d'alimentation, mais en admettant des prélèvements négligeables. Si tel n'était pas le cas, cette retenue devrait être classée dans une autre catégorie définie au paragraphe 4.1.2.3.

La première opération et une partie de la seconde font partie du programme MODSUR du modèle couplé de simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains.

Le modèle MODLAC a été conçu pour être intégré au modèle couplé afin de pouvoir simuler les écoulements de surface, compte tenu des aménagements hydrauliques de stockage en surface.

4.1.2.3. La troisième opération réalise, au niveau des mailles du réseau hydrographique principal ou mailles rivières, le transfert isochrone des écoulements d'amont en aval en tenant compte des apports des sous-bassins versants décrits au paragraphe précédent y compris les déversements des retenues d'ordre un, des déversements des retenues d'ordre deux situées en amont jusqu'à la retenue aval également d'ordre deux. Ces retenues d'ordre deux reçoivent les eaux de déversement des retenues amont, tandis que les retenues d'ordre un sont des retenues situées en tête de bassin versant.

Au niveau de la retenue aval, un bilan complet est réalisé en tenant compte des apports amont vus ci-dessus, des pertes par évaporation sur la retenue et des apports pluviométriques directs, mais aussi des prélèvements effectués sur la retenue, des rejets (transfert venant de retenues sur d'autres bassins) et des débits réservés pour l'aval immédiat du barrage (annexe 1 - paragraphe 2.3.).

Ainsi d'amont vers l'aval les bilans en eau des retenues d'ordre deux et les transferts sont réalisés successivement sur chacun des bassins versants du domaine de la surface.

4.1.2.4. Produits obtenus

De très nombreux résultats peuvent être fournis par une simulation complète.

- bilan hydrique global pour chaque zone pluviométrique et chaque fonction production, avec si besoin est le bilan par phase,
- la production totale en eau sur chaque sous-bassin de calcul et chaque sous-bassin réel au cours de la simulation,
- les écoulements sur chaque sous-bassin de calcul à chaque pas de temps,
- les valeurs d'état de chaque retenue du type *un* ou du type *deux* à chaque pas de temps, niveau, surface, volume stocké, selon la demande,
- les débits à l'aval des retenues d'ordre *deux* (débit de déversement plus débit réservé ou turbiné),
- les débits aux stations hydrométriques et aux emplacements intéressants,
- les déficits de fourniture, au cours de la période, des prélèvements ou des débits réservés,
- des informations complètes à des dates précisées : superficie et volume des retenues de bassin amont sur chaque bassin versant et pour chaque retenue d'ordre *deux*.

Il convient de dire que la prise en compte des effets du remplissage des retenues et des effets de rupture de retenues se réalise automatiquement par le modèle, si les dates de mise en service et de rupture sont spécifiées.

4.2. DOUBLE STRUCTURE DES BASSINS VERSANTS AVEC RETENUES

Il existe dans les modèles hydrologiques à discrétisation spatiale une organisation générale du drainage unique pour chacun des bassins versants du domaine de surface qui permet de dresser une arborescence complète et définitive, reflet de l'écoulement naturel des eaux.

Cette structure va nous permettre de réaliser deux sortes de réorganisation des mailles de drainage :

- les mailles formant les sous-bassins versants additionnels d'amont en aval, bassins versants dont l'exutoire est une maille particulière,
- les mailles particulières dites mailles rivières constituent le réseau hydrographique principal.

Les deux ensembles vont pouvoir permettre les déterminations de l'écoulement naturel.

Par contre, lorsqu'il existe des retenues en cascade d'amont en aval il est nécessaire de connaître au préalable les résultats exacts des bilans des retenues situées en amont pour exécuter le transfert et le bilan dans la première retenue aval. D'où l'existence d'une nouvelle structure hydraulique des bassins déterminée par la présence des retenues à un instant donné, mais évolutive dans le temps compte tenu de la construction de nouvelles retenues.

Il est donc impératif de rechercher la structure unique, union de toutes structures possibles au cours de la période de simulation des écoulements, y compris celle correspondant à des aménagements prévus ou envisagés.

On recherchera, au moment du passage du programme GEOCOU, toutes les mailles du bassin sur lesquelles il peut exister une retenue d'ordre *deux*, une station hydrométrique ou la maille d'une retenue d'ordre *un* qui changera l'ordre par la création d'une retenue en amont. Puis de les transformer en mailles rivières ainsi que toutes les mailles de surface situées sur le parcours de chaque retenue à l'exutoire du bassin.

A chaque exutoire de bassin, à chaque station hydrométrique, à chaque emplacement futur d'une retenue, on créera une retenue fictive ayant comme caractéristiques : surface maximale du plan et volume maximal de la retenue, nuls.

Une retenue détruite un jour donné sera considérée comme une retenue fictive le jour suivant.

L'organisation de la structure hydraulique des bassins sera réalisée d'après la structure naturelle des bassins et la présence d'un certain nombre de retenues réelles ou fictives, grâce au sous-programme ORGLAC.

4.3. BILAN DES LACS AMONT OU LAC D'ORDRE « UN »

Le bilan des retenues amont ou d'ordre *un* s'effectue indépendamment des bilans sur les autres retenues amont.

Soit : Q_2 le volume issu de la maille bassin *IM* contenant la retenue étudiée (Q_2 exprimé en m^3), *SMAIL* la superficie de cette maille *IM* (*SMAIL* exprimé en $1\ 000\ m^2$), *SMD2* le rapport de la superficie du bassin d'alimentation de la retenue *IM* à la superficie de cette maille *SMAIL*, *QTR* le terme $P - ETP$ ou apport en mm d'eau au plan d'eau et enfin *SLAC* la superficie du lac à cet instant.

L'alimentation $VALI$ en m^3 de la retenue s'écrit :

$$VALI = SMD2 \times Q2 + SLAC \times (QTR - Q2 / SMAIL)$$

terme exact si le bassin d'alimentation est compris à l'intérieur de la maille ou $SMD2 < 1$, sinon encore exact dans le cas où les productions sur les mailles amont son identiques.

Si $VLAC$ est le volume de la retenue et $VMAX$ le volume maximal au déversement, le terme $VALI + VLAC$ sera comparé à $VMAX$.

Cas $VALI + VLAC > VMAX$, la retenue sera pleine et le volume déversé $VDEV$ égal à $VALI + VLAC - VMAX$, le nouveau volume de la retenue sera $VMAX$.

Cas $VALI + VLAC < VMAX$, la retenue ne sera pas pleine et $VDEV = 0$, le nouveau volume du lac sera augmenté de $VALI$.

L'écoulement total issu de la maille sera donc :

$$Q2 \times (1 - SMD2) + VDEV \tag{1}$$

Pour toutes les mailles bassins du sous-bassin versant de calcul nous aurons une sommation de termes semblables à ceux de (1). Il est vérifié au niveau du sous-bassin de calcul si l'écoulement global peut devenir négatif; si oui, les valeurs sont comptabilisées avant d'être remises à zéro.

La seule fois où cet écoulement fut négatif, le terme d'erreur était inférieur à 1/10 000.

4.4. BILAN DES LACS OU RETENUES D'ORDRE « DEUX »

En reprenant les mêmes définitions que ci-dessus, l'alimentation $VALI$ en m^3 de la retenue s'écrit :

$$VALI = \sum_{i=1}^{i=N} Q_i + \sum_{i=1}^{i=M} VDEV_i + SLAC \times (QTR - QR/SVB) - (PA + PR) \times DTS$$

avec QR = apport en m^3 du sous-bassin de calcul de superficie SBV .

PA et PR = les débits de prélèvement et débits réservés.

DTS = la durée en secondes de la période de calcul.

Q_i = l'apport du sous-bassin de calcul correspondant à la maille rivière i .

$VDEV_i$ = le volume restitué à l'aval de la retenue i .

Par comparaison de $VALI$ au volume maximal de la retenue, on détermine le volume déversé $VDEV$ par la retenue auquel on ajoute le volume dû au débit réservé $PR \times DTS$. D'où la disponibilité

$VDEV + PR \times DTS$ pour la retenue aval.

5. FONCTION DES DIFFÉRENTS MEMBRES DU PROGRAMME MODLAC

Le programme MODLAC comprend 23 sous-programmes :

MODLAC — EDIDOC — PRODC — PRODUF — EAUG — EAUG2 — EXISTB — DONACB — LACHVS — ORGLAC — MARIAM — EXISTK — DONACU — CLASS — LACBAS — DECOD — SOMME — SOMMEB — INFILT — COULAC — SELFP — COMPQL — TRACII

MODLAC = Ce sous-programme fait appel directement à 11 sous-programmes pour réaliser les opérations présentées dans le texte. Il sera donné ici la fonction de ces sous-programmes (fig. 3).

EDIDOC = A pour objet de lister les cartes commandes du déroulement du programme MODLAC et de conserver les commandes avec les résultats.

PRODC = A pour objet de déterminer pour chaque type de fonction production et pour chaque zone pluviométrique, la lame ruisselée et la lame infiltrée à chaque pas de temps.

EXISTB = A pour objet de connaître la position de la (ou des) retenue(s) sur des mailles bassins ainsi que les caractéristiques de celles-ci au jour même de leur mise en eau ou de destruction.

ORGLAC = A pour objet d'organiser le schéma de drainage d'une retenue à l'autre, d'enregistrer toutes les mailles rivières (sous entendu sous-bassins versants de calcul) qui apportent un écoulement directement à la retenue sans passer par une retenue amont de manière à réaliser le bilan en eau de chaque retenue compte tenu des prélèvements, des rejets et des débits réservés.

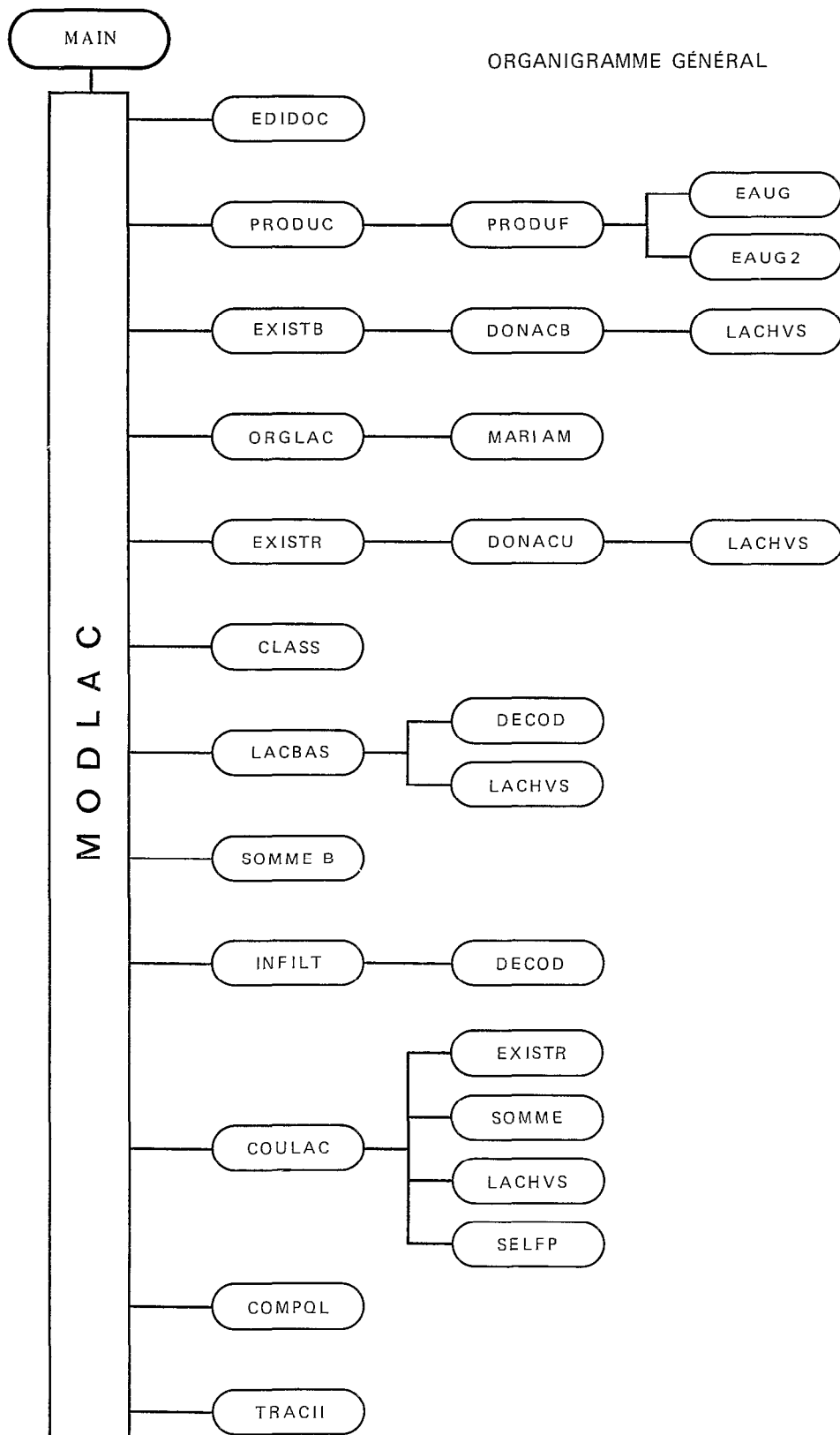


Fig. 3. — Programme MODLAC

- EXISTK** = Même objectif que **EXISTB** mais pour les retenues d'ordre *deux*.
- CLASS** = A pour objet de classer les mailles par temps de parcours à l'exutoire du sous-bassin de calcul.
- LACBAS** = A pour objet de réaliser le bilan d'eau dans chacune des mailles du bassin contenues dans un sous-bassin versant de calcul et de déterminer la valeur de l'écoulement net issu de ce sous-bassin.
- SOMMEB** = Réalise la mise en mémoire des superficies et des volumes de chaque retenue et détermine les superficies en eau et les volumes stockés sur chacun des bassins aux dates pré-choisies par l'opérateur.
- COULAC** = Assure, au niveau de chaque retenue d'ordre *deux*, le transfert isochrone sur les mailles rivières des productions de chacun des sous-bassins versants de calcul, tout en effectuant le bilan en eau dans celle-ci. Toutes ces mailles rivières sont bien entendu situées entre les retenues immédiatement à l'amont et cette dernière.
Il comptabilise les déficits en eau pour satisfaire aux demandes.
- COMPQL** = Assure la mémorisation des débits écoulés au pied des retenues réelles ou fictives.
- TRACII** = Présente le graphique de variation dans le temps des débits ainsi calculés.

5.1. SOUS-PROGRAMMES PARTICULIERS

- PRODUF** = Organise les déterminations des bilans sur les plans d'eau ou l'orientation des calculs sur les zones de production.
- EAUG** = Détermine le ruissellement, l'infiltration brute sur ce type de fonction production et une zone pluviométrique donnée, compte tenu des différentes valeurs *ÉTP*, *R* et *P*.
- EAUG2** = Même objectif que **EAUG** mais il y a eu introduction d'un laminage du ruissellement et un étalement de l'infiltration dans le temps.
- DONACB** = Assure la lecture des caractéristiques des retenues et détermine les matrices *SA* et *VA* des surfaces et des volumes de la retenue pour des hauteurs décroissantes de l'eau dans celles-ci. Il initialise les valeurs de la surface du plan d'eau et du volume d'eau pour la cote initiale fournie.
- LACHV** = Détermine la cote et la surface de la retenue pour un volume donné de la retenue, mais aussi la surface et le volume de la retenue pour une cote donnée de la retenue.
- MARIAM** = A pour objet de rechercher pour une retenue donnée toutes les mailles rivières qui alimentent directement la retenue sans passer par une autre retenue amont.
- DONACU** = Même objectif que **DONACB** mais pour les retenues d'ordre *deux*. Il existe cependant des contrôles de possibilité de repérage, en effet, la maille portant cette retenue doit être une maille rivière et doit être sélectionnée pour porter une retenue.
- DECOD** = Inactif dans ce programme, sera opérationnel dans les programmes à venir.
- INFILT** = A pour objet de mettre dans le réseau de surface la lame d'eau destinée à l'infiltration.
- SOMME** = Même objectif que **SOMMEB** mais pour les retenues d'ordre *deux*.
- SELEFP** = A pour objectif de fournir au moment de la simulation les valeurs des prélèvements, des rejets et des débits réservés à un pas de temps constant multiple du pas de temps des données de précipitation.

6. CONCLUSION

L'avantage d'un tel modèle de simulation des écoulements de surface, sur des bassins versants équipés de réservoirs de stockage superficiel et de conduites de transfert d'eau inter-bassins, réside en la possibilité de connaître l'évolution spatio-temporelle des influences de chacun des aménagements sur un système hydrologique défini.

De plus ce modèle a l'avantage de permettre la reconstitution temporelle et spatiale des ressources en eau, d'un ensemble de bassins versants sur lesquels des aménagements hydrauliques complexes ont été mis en service graduellement dans le temps, lorsque sont connus les historiques complets des diverses utilisations, transferts et autres de l'eau dans chacun des réservoirs.

L'auteur a conçu ce modèle hydrologique avec le désir de fournir, aux gestionnaires des différents réseaux de mesures de l'eau à divers stades de son cycle terrestre, un outil susceptible non seulement d'intégrer l'ensemble des mesures effectuées, mais aussi de mieux connaître la validité de celles-ci et de discerner les mesures particulières qui font le plus défaut pour l'étude des ressources en eau et leur gestion sur un ensemble régional de bassins versants équipés hydrauliquement.

ANNEXE

SOMMAIRE

1. *Procédés pratiques de discrétisation*
 - 1.1. Procédés généraux de discrétisation
 - 1.1.1. Eléments pour l'étude
 - 1.1.2. Domaine d'étude
 - 1.1.3. Numérotation des mailles du schéma-type
 - 1.1.4. Choix des mailles
 - 1.1.5. Présence de retenues et limites de bassin
 - 1.1.6. Numérotation des mailles de la surface
 - 1.2. Schématisation du drainage de surface
 - 1.2.1. Itinéraire de drainage
 - 1.2.2. Mailles rivières
 - 1.3. Caractéristiques physiographiques
2. *Caractéristiques des retenues*
 - 2.1. Retenues de tête de bassin
 - 2.2. Retenues normales
 - 2.3. Prélèvement dans les retenues d'ordre deux

1. PROCÉDÉS PRATIQUES DE DISCRÉTISATION

Il n'est pas envisagé, dans cet article, de présenter tous les procédés pratiques de discrétisation du domaine de surface pour une étude donnée, mais de faire un bref rappel des éléments essentiels et de préciser ceux relatifs à la discrétisation en mailles carrées emboîtées du domaine et au voisinage des retenues.

1.1. PROCÉDÉS GÉNÉRAUX DE DISCRÉTISATION

1.1.1. *L'objet de l'étude* étant défini et l'ensemble des bassins versants à modéliser étant répertorié, il convient de se munir des éléments de travail suivant :

- a) un jeu de cartes topographiques de la région à étudier, dont l'échelle permet de circonscrire l'ensemble des bassins dans un rectangle de dimension maximale 140×100 cm ;
- b) d'un autre jeu de cartes topographiques à échelle plus grande, afin de connaître l'environnement ;
- c) un contre-calque indéformable comportant un maillage primaire carré de 8 ou 10 cm de côté, dont le tracé est normal, et un maillage secondaire carré de 4 ou 5 cm de côté en trait plus fin. Le centre de chaque carré de côté 4 ou 5 cm portera une petite croix permettant un nouveau découpage en maillage tertiaire ;
- d) des jeux de cartes géologiques, de cartes de couverture végétale à la même échelle que celle définie en b ;
- e) de moyens de travail : table lumineuse, table à dessin, matériel de dessin.

1.1.2. *Le domaine d'étude du système hydrologique* doit être inclus dans le maillage préparé et doit obligatoirement être borné par une rangée supplémentaire de mailles primaires horizontalement et verticalement sur chaque direction.

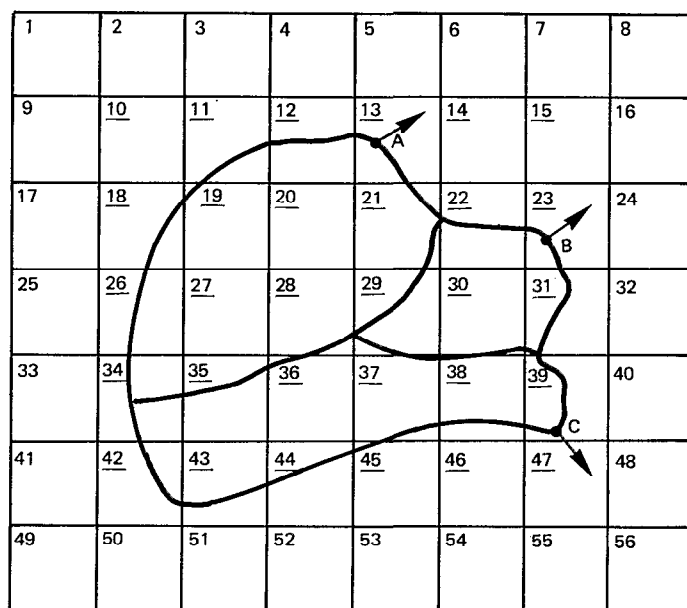


Fig. A 1. — Maillage primaire ou schéma type de côté 8 A

Les exutoires A, B, C des trois bassins versants portés sur la figure A 1 permettent, d'après le tracé des lignes de partage des eaux, de choisir toutes les mailles soulignées formant le rectangle circonscrit au domaine d'étude. Les mailles non soulignées font partie des rangées supplémentaires précédemment indiquées.

Sur cette figure le quadrillage secondaire n'a pas été dessiné. Le nombre de mailles primaires ou mailles du schéma-type dans le sens de la largeur est dénommé « LAR », celui dans le sens de la hauteur « LONG ». Dans cet exemple : LAR = 8, LONG = 7.

1.1.3. *La numérotation des mailles du schéma-type* s'effectue à partir de la maille située en haut et à gauche numérotée 1 en allant de la gauche vers la droite, puis ligne par ligne du haut vers le bas par accroissement d'une unité à chaque maille.

Pour des raisons d'encombrement maximal, il est généralement admis que le nombre de ces mailles du schéma-type ne devrait dépasser la valeur 500 que très rarement et rester toujours inférieur à 800.

Ces mailles schéma-type de quadrillage primaire ainsi numérotées vont servir de base au repérage des mailles de différentes tailles (coté 8a, 4a, 2a et a) qui vont être maintenant utilisées pour discrétiser le domaine de surface.

Les mailles de coté 8a (8 ou 10 cm) sont qualifiées « grandes mailles » ; celles de coté 4a (4 ou 5 cm) sont qualifiées « mailles moyennes » ; celles de coté 2a (2 ou 2,5 cm) sont qualifiées « mailles petites » ; et celles de coté a (1 ou 1,25 cm) sont qualifiées « micro-mailles ».

Les dimensions de la grande maille exprimées en mètres sont presque toujours des multiples de 2 et de 5. A ce jour, les dimensions utilisées sont restées comprises entre 200 et 10 000 mètres pour des études fines aux études de grands bassins versants.

Le quadrillage initial est placé sur le plan topographique de telle manière que celui-ci coïncide avec le carroyage UTM ou avec le carroyage Lambert.

1.1.4. *Choix des mailles pour la discrétisation.* Dans les zones à faible variation des caractéristiques physiographiques ou à faible densité d'information, on se doit de conserver comme grandes mailles les mailles du quadrillage primaire.

Avec trois points d'observations A, B, C sur la maille schéma-type 29, on se doit de décomposer cette grande maille en quatre mailles moyennes définies par les tirets (fig. A 2).

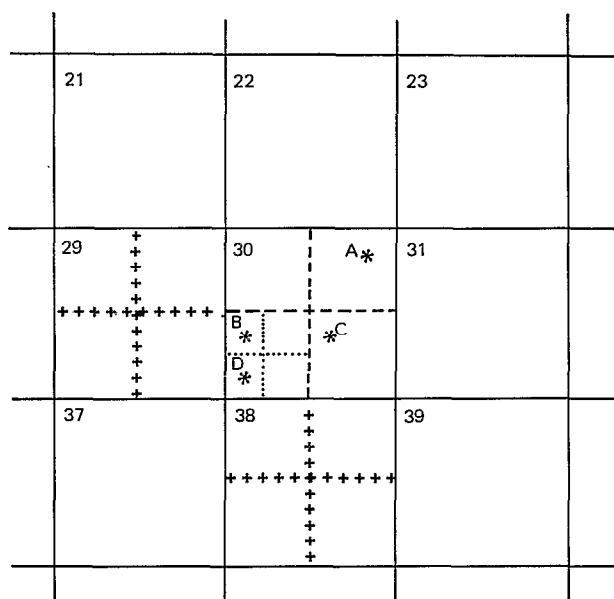


Fig. A 2. — Choix des mailles et contraintes

Avec l'adjonction d'un autre point d'information D, la maille moyenne serait à décomposer en quatre mailles petites matérialisées par des petits points. Or, impérativement une maille donnée ne peut avoir comme maille voisine que :

- soit une maille de même dimension,
- soit deux mailles de dimension moitié,
- soit une partie (moitié) d'une maille deux fois plus grande.

Les mailles 29 et 38 devront alors être coupées en quatre pour respecter la règle ci-dessus. Elles sont matérialisées par des petites croix sur la figure A 2.

1.1.5. *Présence de retenues et limites de bassin.* La discrétisation en mailles carrées emboîtées impose une stylisation des lignes de partage des eaux entre sous-bassins versants et bassins versants. Il suffit de respecter les surfaces de chaque partie.

La présence de retenues avec bassin d'alimentation propre accroît les difficultés lors de la discrétisation. Il est conseillé de procéder à un découpage des mailles lorsqu'elles contiennent plusieurs retenues.

Si ces retenues deviennent trop petites, il est possible — comme nous le verrons ci-après — de les associer et de les remplacer par une seule.

Pour des retenues situées en série dans une même maille, soit le découpage de la maille est possible, soit la position de la retenue amont est déplacée virtuellement dans la maille immédiatement à l'amont.

1.1.6. *Numérotation des mailles de la surface.* Cette numérotation de l'ensemble des mailles du domaine de surface, qui sera modélisé, est indépendante de la numérotation des mailles du schéma-type qui avait pour objet un repérage fixe des mailles du domaine.

Cette numérotation s'effectue de la gauche vers la droite et de haut en bas dans le sens des aiguilles d'une montre, à l'intérieur des découpages successifs et à partir de l'unité.

L'objet de cette numérotation ordonnée est de retrouver facilement la position de la maille sur un plan.

1.1.7. *Repérage de la position d'une maille du domaine.* Il s'agit de situer une maille précédemment numérotée à l'intérieur de la maille du schéma-type par un procédé simple. Un nombre de trois chiffres composé comme ci-dessous indiqué le permet (fig. A 3).

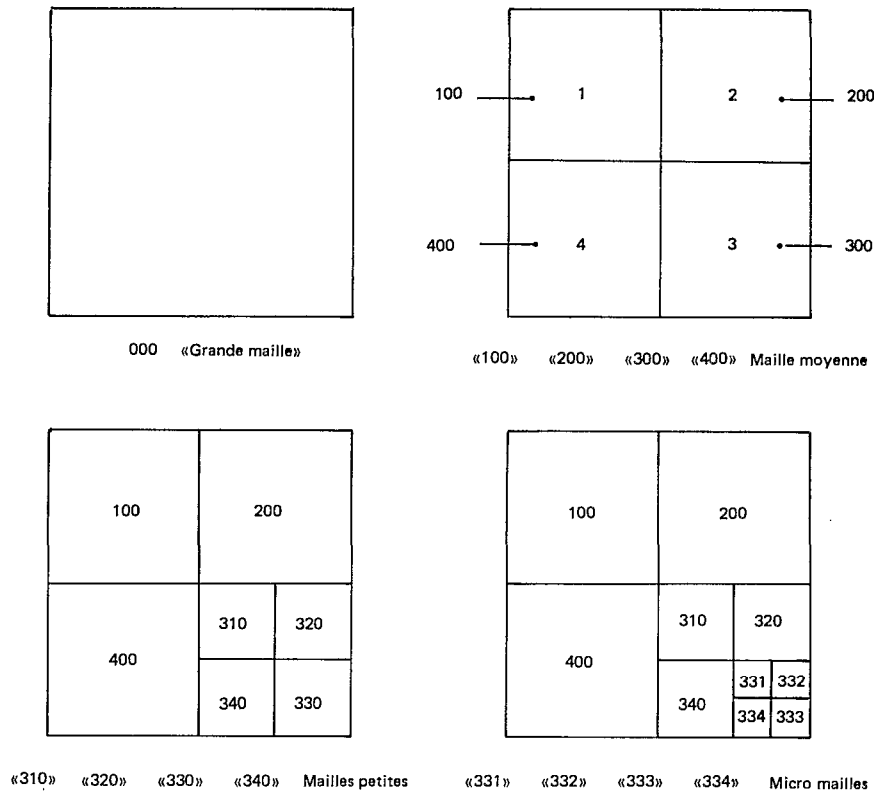


Fig. A 3

000 indique que la maille numérotée est une grande maille, elle correspond à la maille du schéma-type ;

100-200-300-400 indiquent chacun une maille numérotée de taille moyenne en position 1, 2, 3 ou 4 à l'intérieur de la maille schéma-type.

Par analogie le chiffre des dizaines indique la position de la maille dans le découpage de la maille moyenne. L'existence de cette dernière implique un chiffre des centaines égal à 1, 2, 3 ou 4, mais pas 0.

Le chiffre des unités indique la position de la maille dans le découpage de la petite maille.

La micro-maille affectée du nombre 331 est située :

- en position 3 de la grande maille,
- en position 3 de la maille moyenne,
- en position 3 de la petite maille.

Récapitulons :

- A une maille numérotée dans la couche de surface correspond un numéro de la maille schéma-type la contenant et un nombre de trois chiffres qui indique la grandeur de la maille et sa position à l'intérieur de la maille schéma-type.
- La planche A 4 présente un modèle d'image-carte permettant d'introduire les éléments de définition du maillage pour l'étude. On note sur chaque ligne huit champs de 10 caractères.
- IOP : est le numéro de la maille.
- NSCH : est le numéro de la maille schéma-type qui contient cette maille IOP.
- Les trois colonnes réservées à droite de NSCH donneront le nombre définissant la dimension de la maille IOP et sa position dans la maille schéma-type NSCH.

CARTE DE DEFINITION DU MAILLAGE DANS MODELE COUPLE														BASSIN :				PAGE	
PREPARE PAR :										DATE :									
IOP	NSCH	IOP	NSCH	IOP	NSCH	IOP	NSCH	IOP	NSCH	IOP	NSCH	IOP	NSCH	IOP	NSCH	IOP	NSCH	IOP	NSCH
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
2																			
3																			
4																			
5																			
6																			
7																			
8																			
9																			
10																			
11																			
12																			
13																			
14																			
15																			
16																			
17																			
18																			
19																			
20																			

Hydrologie O.R.S.T.O.M.

Fig. A 4

1.2. SCHÉMATISATION DU DRAINAGE DE SURFACE

Le domaine de surface constitué par l'ensemble des bassins versants à étudier étant parfaitement discrétisé par le maillage précédemment défini, il convient d'indiquer pour chacune des mailles le sens de drainage de l'écoulement issu de celle-ci ou transitant par elle.

1.2.1. *Itinéraire de drainage.* Compte tenu de la règle géométrique pour le dimensionnement des mailles voisines d'une maille donnée, le « canal » de drainage de la maille sera choisi parmi les huit cheminements possibles (quatre directions se dédoublant suivant la position cardinale de l'exutoire de la maille).

La recherche d'arborescence du réseau de drainage du bassin versant exige qu'une maille donnée ne puisse avoir qu'un seul sens de drainage, ce qui est généralement le cas.

Si un cours d'eau présente des défluences très importantes, il ne pourra y avoir actuellement de simulation des écoulements sur le bassin. Cependant, il est possible de procéder en deux étapes :

- a) Simuler les écoulements sur la partie située juste à l'amont de cette défluence importante.
- b) Simuler les écoulements sur l'ensemble de la partie aval en tenant compte des arrivées de débit au modèle en deux mailles voisines. La répartition du débit calculé dans la première simulation pour chacune des mailles dans la seconde simulation s'effectuera en conformité avec la réalité.

Une autre solution consisterait à alimenter la maille en dérivation par des transferts modulés selon les apports à la maille présentant la défluence.

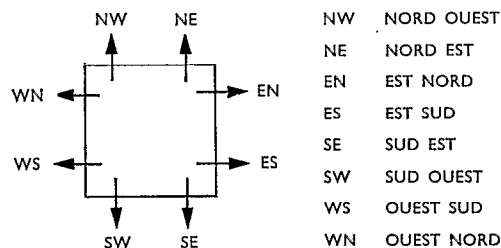


Fig. A 5

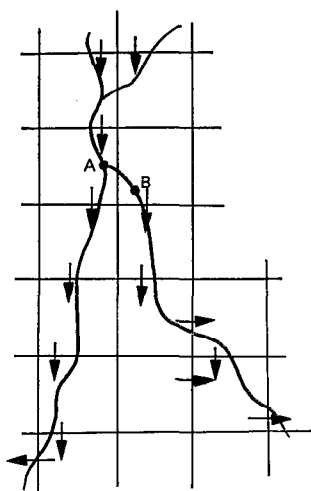


Fig. A 6

Ainsi le transfert naturel entre A et B ne serait pas représenté dans la structure du modèle de base. Le drainage naturel serait représenté par les flèches de la figure A 6.

Par contre, au niveau des transferts de débits imposés d'une maille vers une autre maille, il est possible d'indiquer que le débit dérivé de A vers B est lié à l'apport total à la maille A.

L'exutoire d'un bassin versant est par convention indiqué par une direction d'écoulement « EX ».

1.2.2. *Mailles rivières.* Chacune des mailles du domaine de surface porte une flèche indicatrice du sens de drainage ou plutôt de l'écoulement superficiel. Il s'agit de répertorier les mailles rivières parmi toutes les mailles à partir des considérations ci-dessous :

- a) toute maille contenant une station hydrométrique ancienne, présente ou future, est considérée comme une maille rivière ;
- b) toute maille contenant une retenue d'eau de hauteur d'eau maximale de plus de 11 mètres est considérée comme une maille rivière, que cette retenue soit actuelle, détruite ou à construire ;
- c) toute maille contenant une retenue de faible hauteur d'eau, laquelle reçoit des écoulements provenant d'une ou plusieurs retenues situées en amont, est considérée comme une maille rivière que cette retenue soit actuelle, détruite ou à construire.

La structure hydraulique d'aménagement doit contenir l'ensemble des aménagements existants depuis le début de la simulation jusqu'à la fin, cela afin que le modèle soit à même d'en tenir compte quand chaque aménagement entre en activité.

A partir du moment où toutes ces mailles rivières sont définies sur la carte du maillage du domaine de surface, il suffit alors de suivre, à partir de chacune d'elle, la flèche de drainage d'une maille à l'autre, toutes ces mailles traversées seront des mailles rivières.

1.3. CARACTÉRISTIQUES PHYSIOGRAPHIQUES

A l'aide de la carte topographique, l'altitude minimale de chaque maille sera déterminée.

A l'aide de la carte de la couverture végétale et de la carte géologique, ou à défaut pédologique, on définit les grandes unités physiographiques qui seront retenues pour une attribution aux mailles du bassin.

2. CARACTÉRISTIQUES DES RETENUES

Pour définir la relation surface-hauteur d'une retenue, le topographe de terrain a filé les courbes de niveau en cote ronde de la cuvette et a ensuite effectué les planimétrages. L'opération aurait été équivalente par utilisation de la photo-restitution.

Il est donc naturellement valable de procéder d'une manière aussi simple que possible et de fournir pour une retenue les superficies des plans d'eau pour des cotes à intervalles réguliers, le mètre par exemple. Pour plus de précision, on peut utiliser un sous-multiple de mètre.

Si $SA(N,1)$ est la superficie du plan d'eau de la retenue N pour la cote de déversement, $SA(N,2)$ la superficie du plan d'eau de cette même retenue pour une cote de 1 mètre en dessous du seuil du déversoir, $SA(N,1+i)$ la superficie du plan d'eau de cette retenue pour une cote i mètres en dessous du déversoir, ceci jusqu'à la retenue vide ou $SA(N,1+IH)$ égal à zéro pour une retenue de $I H$ mètres.

Cette matrice SA donnée en entrée permettra de déterminer la matrice $VA(N,1+i)$ représentant le volume de la retenue pour la cote i mètres au-dessous du déversoir.

2.1. RETENUE DE TÊTE DE BASSIN OU D'ORDRE UN

Au paragraphe 1.2.2. nous avons vu la distinction faite sur le type de retenue au moment de la définition de la structure hydraulique de l'aménagement.

Pour les retenues de tête de bassin versant, ou par extension des retenues qui ne reçoivent effectivement pas d'eau ayant transité dans une retenue bien que la maille la contenant soit une maille rivière, il est nécessaire de donner la valeur du paramètre $SMDA$, rapport de la superficie du bassin d'alimentation de la retenue à la surface de la maille qui contient cette retenue.

Si le bassin d'alimentation est très grand par rapport à la surface de la maille $SMDA > 2$, il peut exister une légère erreur sur le bilan de l'eau dans la retenue, mais seulement quand les productions d'eau sur les mailles amont sont différentes.

Si sur une même maille il existe deux retenues de tête de bassin appelées dans ce qui suit retenues d'ordre un , on peut sans grand risque créer une retenue fictive unique dont les caractéristiques sont obtenues par sommation. Avec ce procédé d'association, l'équation du bilan d'eau est vérifiée tant que les profondeurs maximales sont relativement peu différentes.

2.2. RETENUE NORMALE OU D'ORDRE DEUX

Impérativement, il ne peut exister plus d'une retenue sur une maille, cette retenue recevant des apports issus des déversements de retenues situées à l'amont. Ce type de retenue est désigné par « retenue d'ordre deux ».

Pour ces retenues, le bilan en eau est parfaitement bien déterminé à chaque pas de temps.

A la limite, si toutes les mailles du bassin étaient classées comme maille rivière, toutes les retenues pourraient être d'ordre deux.

Mais alors que de temps calcul pour un gain en précision infime !...

2.3. PRÉLÈVEMENT DANS LES RETENUES D'ORDRE DEUX

On peut considérer deux sortes de type de prélèvements :

- a) les prélèvements dans la retenue destinés aux utilisations consommatrices d'eau (eau d'irrigation, eau d'alimentation humaine ou animale, eau industrielle...) seront comptés en valeurs nettes, c'est-à-dire représenteront le débit effectivement consommé compte tenu des débits de colature. Ces derniers débits réintègrent le cours d'eau d'une manière immédiate. Ce premier type de prélèvement est un débit de perte pour l'aménagement,
- b) les débits réservés, c'est-à-dire prélevés dans la retenue pour obtenir à l'aval immédiat de la retenue un débit au moins égal à ce débit réservé.

Volontairement nous avons mis dans les prélèvements de type a) ceux destinés à être transférés dans une ou plusieurs autres retenues où, en un point du bassin défini par la maille rivière qui le contient et si ce point est à l'extérieur du domaine d'étude, le débit dérivé est perdu pour le système.

Ces débits dérivés totalisés pour les N transferts seront ajoutés aux prélèvements nets définis en a) pour obtenir le prélèvement total.

Les retenues recevant ces transferts auront alors une valeur de prélèvement de type a) négative, c'est-à-dire recevront des débits. Si les débits ont été transférés vers une maille rivière, il est impératif de créer à cet endroit une retenue d'ordre deux fictive (superficie et volume, à hauteur maximale, nuls).