

DOCUMENT



n° 8113

THÈSE

présentée pour l'obtention du Diplôme

de

Docteur-Ingénieur

à

l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris

et à

l'Université Pierre et Marie Curie - Paris VI

par

Emmanuel LEDOUX

MODÉLISATION INTÉGRÉE DES ÉCOULEMENTS DE SURFACE ET DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS SUR UN BASSIN HYDROLOGIQUE

Soutenu le 19 Décembre 1980

devant le jury composé de :

R. LETOLLE	Président
G. GIRARD	Rapporteur
R. DEGALLIER	Examineur
G. de MARSILY	Examineur
C. THIRRIOT	Examineur
J.-P. VILLENEUVE	Examineur

R E S U M E

La modélisation mathématique des écoulements sur un bassin hydrologique a déjà fait l'objet de nombreuses recherches tant en France qu'à l'étranger. Les modèles qui en ont résulté mettent tantôt l'accent sur les écoulements de surface tantôt sur les écoulements souterrains, rendant ainsi difficiles les applications dans les cas où les ressources en eau des deux domaines sont équilibrées.

Le présent travail tente de résoudre le problème de la simulation conjointe des écoulements superficiels et des écoulements souterrains entre le moment où l'eau est disponible à la surface du sol sous forme de précipitation et celui où elle se retrouve aux différents exutoires du bassin. Cet objectif a semble-t-il été atteint grâce à une modélisation à discrétisation spatiale faisant intervenir les paramètres physiographiques des domaines superficiels et souterrains.

Ce travail s'est concrétisé par la réalisation d'un programme informatique qui a reçu le nom de "modèle couplé" dont les possibilités d'emploi seront illustrées au moyen de deux exemples pris parmi des bassins versants français.

La première partie du mémoire se propose de rappeler la méthodologie couramment utilisée pour les études de ressources en eau. On y distingue habituellement les études d'inventaires à caractère essentiellement descriptif, et les études de modélisation intervenant plus tardivement lorsqu'une quantité importante d'information est disponible. Il est proposé de rassembler les deux approches au sein d'une même étude capable de synthétiser l'ensemble des données. Le "modèle couplé" qui prend en compte une part importante du cycle de l'eau peut constituer un moyen d'atteindre cet objectif.

Dans la seconde partie sont décrits les principes de construction du modèle. Le "modèle couplé" est centré autour de cinq fonctions que l'on a voulu nettement individualisées :

- la fonction d'entrée qui détermine la quantité d'eau pénétrant dans le système;

- La fonction production dont le rôle est de répartir les précipitations entre infiltration, ruissellement et stockage dans le sol en fonction des caractéristiques physiographiques discrétisées du bassin;

- la fonction de transfert de surface dont l'objectif est d'acheminer l'eau de ruissellement vers les exutoires du réseau hydrographique. Ce transfert est effectué en organisant la discrétisation spatiale initiale du domaine de surface en zones de ruissellement pur et en zones d'écoulement en rivières;

- la fonction de transfert souterrain qui réalise l'intégration des équations de l'écoulement en milieu poreux sur un domaine multicouche représentant l'empilement des couches aquifères et semi-perméables tel qu'on le rencontre sur un bassin hydrogéologique.

- enfin la fonction d'échange nappes-rivières qui règle la communication hydraulique entre le domaine souterrain et le domaine superficiel en des points privilégiés figurant le réseau hydrographique principal.

La méthodologie proposée est mise en oeuvre sur deux bassins versants présentant des caractéristiques bien distinctes.

Le premier exemple concerne la rivière Caramy dans le département du Var. Sur ce bassin versant, d'une superficie d'environ 200 km², coexistent un écoulement de base alimenté par de puissants aquifères calcaires, ainsi qu'un ruissellement donnant lieu à des crues importantes, ce qui en fait un bon exemple méthodologique. Une douzaine d'années d'observations en deux stations hydrométriques, ainsi que quelques mesures piézométriques, ont permis un calage satisfaisant du modèle couplé, qui valide les hypothèses faites pour la schématisation du système.

Le second exemple décrit le bassin versant crayeux de la Haute Lys dans le Nord de la France. A l'opposé du cas précédent les écoulements souterrains ont ici une place prédominante. L'essentiel du travail a porté sur la reconstitution des variations piézométriques observées dans deux nappes superposées de la craie, ainsi que sur la restitution du débit en six stations du réseau hydrographique.

En conclusion il est tenté de prouver la souplesse d'emploi du modèle couplé dont la structure se prête aussi bien à la description détaillée de bassins où l'information abonde comme ceux du Caramy ou de la Lys, qu'à une schématisation beaucoup plus grossière mais néanmoins cohérente, qui aurait par exemple sa place au moment de l'inventaire des ressources en eau.

TABLE DES MATIÈRES

	page
AVANT-PROPOS	1
INTRODUCTION	5
 <u>PREMIERE PARTIE: POURQUOI UN MODELE COUPLE ? DESCRIPTION DES OBJECTIFS ET DES CONTRAINTES DE L'EMPLOI DU MODELE</u>	
I - OBJECTIFS ET METHODES DE L'HYDROLOGIE	9
1) Etude d'inventaire	10
2) Etude de modélisation	12
3) Conséquences de la méthodologie précédente	13
II - PROPOSITION D'ETUDE AU MOYEN DU MODELE COUPLE	15
1) Que peut-on attendre d'un modèle appliqué à l'étude des ressources en eau ?	15
2) Méthodologie d'étude au moyen du modèle couplé	18
a) Analyse des précipitations	19
b) Caractérisation du système hydrologique et discrétisation	20
c) Modélisation des transferts	22
3) Conséquences de la méthodologie proposée	23
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	27
 <u>DEUXIEME PARTIE: PRINCIPE ET CONCEPTION DU MODELE COUPLE</u>	
I - Description du système hydrologique	28
1) Domaine d'étude	29
2) Représentation du cycle de l'eau	31
a) La fonction d'entrée	31
b) La fonction production	32
c) La fonction de transfert de surface	33
d) La fonction de transfert du souterrain	33
e) La fonction d'échange surface-souterrain	34
3) Organisation générale du modèle	34
II - PROGRAMME GEOCOU: DESCRIPTION INITIALE DU SYSTEME	35
1) Discrétisation spatiale	36
a) Définition du maillage	37
b) Contraintes du maillage	37
2) Définition du réseau de drainage de surface	39
a) Réseau hydrographique principal	39

	page
b) Réseau d'écoulement de la zone de ruissellement	40
c) Remarques et synthèse	41
3) Définition des caractéristiques physiographiques	42
a) Discrétisation de l'altitude, calcul des temps de transfert relatifs	42
b) Discrétisation des caractéristiques des fonctions production	43
4) Synthèse des opérations réalisées au stade du programme GEOCOU	44
III - PROGRAMME MODSUR: MODELISATION DE LA FONCTION PRODUCTION ..	45
1) Données météorologiques	45
a) Données concernant les précipitations	45
b) Données concernant l'évapotranspiration	46
2) Calcul des fonctions production	47
a) Description des fonctions production	49
b) Mise en oeuvre des fonctions production	53
3) Transfert de l'eau de surface sur les zones de ruisselle- ment pur	54
a) Etablissement des zones isochrones	54
b) Algorithme de transfert sur un sous-bassin	54
4) Transfert partiel de l'eau de surface dans le réseau hydrographique principal	56
5) Synthèse des opérations réalisées par le programme MODSUR	56
a) Ajustement du bilan hydrologique global	57
b) Ajustement des temps de concentration	58
IV - PROGRAMME NONSAT: MODELISATION DES TRANSFERTS DANS LA ZONE NON SATUREE	58
1) Retard à l'infiltration	60
2) Le modèle de Nash	61
3) Mise en oeuvre du modèle de Nash	64
V - PROGRAMME MODCOU: SIMULATION CONJOINTE DES TRANSFERTS DE SURFACE ET DES TRANSFERTS SOUTERRAINS	65
1) Le transfert souterrain	65
a) Le modèle de transfert	66
b) Les relations avec le milieu extérieur au domaine souterrain	68
c) Mise en oeuvre du modèle de transfert souterrain	69
2) Le transfert dans les rivières	71
a) Constitution des biefs	71
b) Algorithme de transfert	72
c) Calcul des coefficients de vidange	73
3) La relation nappe-rivière	74
a) Mécanisme de la relation nappe-rivière	74
b) Conditions de non linéarité	75
c) Remarques sur les paramètres de la relation nappe-rivière	76
4) Mise en oeuvre des modèles de transfert	77

	page
a) Choix des pas de temps	77
b) Les données nécessaires	79
c) Les résultats	80
5) Extensions et limites des modèles de transfert	80
a) Les problèmes de non linéarité	81
b) Les problèmes de rapport entre la discrétisation spatiale et la discrétisation temporelle	83
VI - SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS	84
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	85
 <u>TROISIÈME PARTIE: APPLICATION DU MODÈLE COUPLE A L'ÉTUDE HYDROLOGIQUE DU BASSIN DU CARAMY (FRANCE)</u>	
I - DESCRIPTION DU DOMAINE DE SURFACE	91
1) Situation géographique et morphologie du bassin	91
2) Végétation naturelle et cultures	91
3) Habitat et industrie	92
4) Hydrologie	92
a) Le réseau hydrographique	94
b) Climatologie	96
c) Modes d'utilisation de l'eau de surface	96
II - DESCRIPTION DU DOMAINE SOUTERRAIN	98
1) Les unités géologiques	98
a) Ensembles lithostratigraphiques	99
b) Ensembles tectoniques	101
2) Les unités hydrogéologiques	103
a) Lithostratigraphie et réservoirs aquifères	103
b) Tectonique et bassins hydrogéologiques	105
c) Les conditions hydrogéologiques particulières	106
III - RAPPORTS ENTRE LE DOMAINE DE SURFACE ET LE DOMAINE SOUTERRAIN	108
1) Extensions relatives des domaines	108
2) Zones d'infiltration, zones de ruissellement	108
3) Relations nappe-rivière	109
4) Régime hydraulique des cours d'eau	110
IV - MODELISATION DU SYSTEME HYDROLOGIQUE	111
1) Les données disponibles	112
a) Les précipitations	112
b) L'évapotranspiration potentielle	115
c) Les mesures hydrométriques	116
d) Les mesures piézométriques	117
e) Exhaure des mines	118
f) Apports et prélèvements en rivière	119
g) Paramètres physiographiques	119
h) Paramètres hydrodynamiques	120
2) Modélisation des écoulements de surface	120
a) Discrétisation du domaine de surface	121
b) Les fonctions production	126
c) Les zones météorologiques	126

	page
3) Modélisation des écoulements souterrains	129
4) Modélisation des relations nappes-rivières	131
IV - MISE EN OEUVRE DU MODELE COUPLE	131
1) Ajustement du modèle de surface	132
a) Calage du temps de concentration	132
b) Calage des fonctions production	132
c) Conséquences de l'ajustement du modèle de surface	133
2) Ajustement du modèle souterrain	134
a) Calage du débit de base aux stations de Vins et de Caramy-Chantiers	134
b) Calage des variations des niveaux piézométriques	135
c) Conduite du calage	135
3) Résultats du calage	136
a) Paramètres de surface	136
b) Paramètres du souterrain	137
c) Résultats des simulations de calage	138
4) Remarques et conclusions sur le calage	152
V - CONCLUSION DE L'ETUDE, TENTATIVE D'EMPLOI DU MODELE	154
1) Influence de l'arrêt de l'exhaure en nappe	155
2) Etude du rendement du soutien du débit d'étiage à partir de pompages en nappe dans les anciennes exploitations minières	158
ANNEXE 1: DEBITS JOURNALIERS OBSERVES DANS LE CARAMY AUX STATIONS DE VINS ET DE CARAMY CHANTIERS - ANNEES 1972 A 1979	161
ANNEXE 2: VOLUMES MENSUELS EXHAURES PAR LES EXPLOITATIONS MINIERES ENTRE 1968 ET 1979	166
ANNEXE 3: NUMEROTATION DES MAILLES DU MODELE SOUTERRAIN	170
ANNEXE 4: PARAMETRES DE CALAGE DU MODELE SOUTERRAIN	178
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	187
 <u>QUATRIEME PARTIE: APPLICATION DU MODELE COUPLE A L'ETUDE DU BASSIN DE LA HAUTE LYS (FRANCE)</u>	
I - CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE	189
II - HYDROGEOLOGIE DU BASSIN DE LA HAUTE LYS	192
III - MODELISATION DES ECOULEMENTS SUR LE BASSIN DE LA HAUTE-LYS ..	194
1) Les données disponibles	194
a) Mesures piézométriques	195
b) Mesures hydrométriques	195
c) Données météorologiques	196
d) Prélèvements en nappe	196
e) Paramètres hydrodynamiques	196
2) Le modèle souterrain	196
a) Domaine modélisé	197
b) Maillage	197
c) Représentation des conditions aux limites	197

	page
3) Le modèle de surface	201
a) Domaine modélisé, maillage	201
b) Réseau de drainage, réseau hydrographique principal .	201
c) Zones météorologiques	202
d) Fonctions production	202
4) La relation surface-souterrain	203
IV - MISE EN OEUVRE DU MODELE	203
1) Calage du modèle souterrain en régime permanent	204
2) Calage des coefficients d'emmagasinement en régime transitoire non influencé	204
3) Calage d'un modèle de pluie efficace et de retard à l'infiltration	204
4) Contrôle de l'ajustement sur une longue période	206
5) Intervention du modèle couplé	206
a) Ajustement des fonctions production	207
b) Calibrage des fonctions de retard	208
c) Simulation d'un historique de référence	209
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	223
 <u>CINQUIEME PARTIE: CONCLUSION - LA MISE EN OEUVRE DU MODELE</u> <u>COUPLE EST-ELLE UNE OPERATION LOURDE ?</u>	
I - APPLICATION DU MODELE COUPLE A L'ECHELLE DE LA FRANCE DESCRIPTION DE LA STRUCTURE	226
II - REMARQUES SUR LA SCHEMATISATION ADOPTEE	227
1) Domaine de surface	227
2) Domaine souterrain	227
3) Cas particulier des nappes phréatiques	228
III - LES DONNEES METEOROLOGIQUES	228
IV - RESULTATS DES SIMULATIONS	229
1) Reconstitution des débits aux exutoires	229
2) Test de l'influence d'une couverture forestière	230

INTRODUCTION

Ainsi qu'il a déjà été annoncé au cours de l'avant-propos, le présent travail constitue une tentative de fusion de deux approches théoriques développées dans le domaine des sciences de l'eau. L'objectif en est la modélisation concrétisée jusqu'à la réalisation de programmes de calcul des maillons du cycle de l'eau constituant les ressources en eau exploitables de l'environnement humain. Le but est donc essentiellement pratique et ne sera ainsi atteint que dans la mesure où un progrès réel sera effectué en vue de la connaissance et de l'utilisation de ces ressources en eau.

Notre modélisation concerne la fraction du cycle de l'eau au cours de laquelle l'eau se trouve utilisable sous forme de ressource à l'intérieur d'un bassin hydrologique. Elle considèrera ainsi le devenir de l'eau entre le moment où elle devient mobilisable à la surface du sol sous forme de précipitations et le moment où elle atteint les exutoires du bassin suite aux différents modes de transfert pouvant exister sur le bassin. Cette association entre les écoulements de surface et les écoulements souterrains nous a fait choisir le nom de "modèle couplé" pour désigner le résultat de cette schématisation.

Chacun des modes de transfert présents à l'intérieur du système a déjà fait l'objet de nombreuses études ayant conduit à des modélisations partielles. C'est ainsi que les écoulements de surface, les lois de l'infiltration à travers la zone non saturée, les écoulements souterrains, donnent lieu à des modèles plus ou moins sophistiqués et

plus ou moins performants dont la mise en oeuvre fournit, depuis plusieurs années, des solutions pratiques aux problèmes de ressources en eau.

Notre apport personnel se situe, à notre avis, dans le choix des modèles qui semblaient le mieux appropriés et dans leur réunion sous la forme d'un modèle unique établi à l'échelle du bassin hydrologique. En tant qu'hydrogéologue, le point de départ de notre travail est constitué par les modèles d'écoulement souterrain à discrétisation spatiale sur lesquels nous avons eu l'occasion de travailler dans le cadre de nos activités à l'Ecole des Mines de Paris.

Cette approche du transfert de l'eau en aquifère basée sur l'intégration numérique des équations résultant des lois de l'écoulement de l'eau en milieu poreux semblait particulièrement compatible avec la représentation conceptuelle des écoulements de surface fondée sur la discrétisation spatiale des caractéristiques physiographiques d'un bassin versant. Un tel modèle ayant été développé à l'occasion de la coopération franco-québécoise a donc retenu notre attention. L'association de ces deux types de modèles voisins par leur approche phénoménologique des écoulements dans le domaine de surface et dans le domaine souterrain constitue donc l'essentiel de notre contribution à la modélisation du comportement d'un bassin hydrologique.

Le présent mémoire est divisé en quatre parties:

- La première partie est consacrée à l'exposé des objectifs de la modélisation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains. En fonction des objectifs, il apparaîtra un certain nombre de contraintes dont la présence contribuera à orienter la réalisation pratique du travail.

- La seconde partie expose les principes du modèle en décrivant la façon dont les différentes étapes du devenir de l'eau seront schématisées.

- Les troisième et quatrième parties enfin s'efforcent, par le biais d'une application sur deux bassins hydrologiques français, de

montrer les possibilités et limitations du modèle. Le premier exemple se situe dans le midi de la France et considère le bassin de la rivière Caramy, le second exemple concerne le bassin crayeux de la Haute Lys dans le nord de la France. Les caractéristiques fort différentes des écoulements présents sur ces deux bassins illustrent la souplesse d'emploi du modèle et son aptitude à rendre compte de la description du cycle de l'eau à l'échelle régionale.

- En conclusion, il sera tenté de montrer la facilité de mise en oeuvre du modèle en prenant comme exemple une schématisation presque caricaturale des ressources en eau à l'échelle de la France entière.

Comme nous l'avons déjà évoqué, bien que la concrétisation essentielle de notre travail trouve sa forme dans un programme de calcul de plus de 4000 instructions, nous n'aborderons pas, dans ce mémoire, les questions concernant la mise en oeuvre du programme, et nous nous bornerons à la description des principes de la modélisation et de quelques applications possibles.

CINQUIEME PARTIE

CONCLUSION

LA MISE EN OEUVRE DU MODELE COUPLE

EST ELLE UNE OPERATION

LOURDE ?

La première partie de ce mémoire avait pour ambition de rapprocher les études d'inventaire des études de modélisation en proposant l'intervention des modèles très tôt dans la connaissance du système hydrologique. Cette méthodologie était fondée sur le fait que les modèles, et en particulier le modèle couplé, considérant une part importante du cycle de l'eau, constituaient un bon outil de synthèse cohérente des informations concernant la ressource en eau d'un bassin versant.

En décrivant tout d'abord les principes d'élaboration du modèle couplé, puis en donnant deux exemples d'application sur des bassins hydrologiques de caractéristiques bien différentes, nous avons voulu apporter quelques arguments convaincants sur le bien fondé de cette proposition.

Les difficultés de détail rencontrées au cours des exemples décrits ayant pu faire croire au lecteur que l'application du modèle couplé relevait d'un niveau élevé de sophistication dans la description des systèmes hydrologiques, nous voudrions pour conclure convaincre que la finesse de modélisation n'est pas nécessairement accompagnée de lourdeur ni de la nécessité d'une grande quantité d'information.

Pour parvenir à ce but, nous prendrons un dernier exemple, celui de la modélisation schématique des ressources en eau à l'échelle de la France, en priant le lecteur de bien vouloir pardonner le caractère peut-être un peu prétentieux d'une telle tentative, en ne considérant que la méthode et non pas le résultat.

I - APPLICATION DU MODELE COUPLE A L'ECHELLE DE LA FRANCE - DESCRIPTION DE LA STRUCTURE

Nous utiliserons essentiellement, pour établir cette schématisation, les cartes géologiques et hydrogéologiques au 1/1500000 récemment élaborées par le BRGM.

Le modèle de surface considèrera en priorité les quatre bassins versants principaux de la France, à savoir ceux de la Seine, de la Loire, de la Garonne et du Rhône, en y adjoignant en second lieu les bassins de la Vilaine, la Charente, l'Adour, la Meuse et la Moselle. Une discrétisation en 307 Mailles de 37,5 km de côté sera adoptée, et servira à définir le réseau de drainage de la Fig. V-1.

Par souci d'extrême simplification, nous ne considèrerons que quatre aquifères essentiels des deux bassins sédimentaires majeurs de la France, à savoir:

- la nappe de la Craie dans le Bassin parisien,
- la nappe de l'Albien dans ce même bassin,
- la nappe du Plio-Quaternaire dans le Bassin aquitain,
- la nappe des Sables Eocènes dans ce même bassin.

La discrétisation de ces nappes en mailles carrées de 37,5 et 18,75 km de côté tiendra compte des nécessités de la modélisation de la relation nappe-rivière le long des cours d'eau principaux (Fig. V-2-1 et 2).

Des valeurs régionales des transmissivités, coefficients de drainance, coefficients d'emmagasinement, établis d'après la littérature seront introduits en se servant de cette discrétisation.

Six catégories de fonctions production seront distinguées suivant les caractéristiques géologiques des formations affleurantes identifiées d'après la carte au 1/1500000 (Fig. V-3):

- ① formations tertiaires assez perméables (Eocène des Bassins parisien et aquitain),
- ② formations tertiaires peu perméables (Oligocène des Bassins parisien et aquitain),
- ③ formations crayeuses du Bassin parisien,

- ④ formations marno-calcaires de bordure des bassins,
- ⑤ formations peu perméables des massifs cristallins, métamorphiques et schisto-gréseux (Massif Central, Pyrénées, Alpes, Vosges et Massif armoricain).
- ⑥ formations perméables des bassins sédimentaires autres que les bassins aquitain et parisien.

II - REMARQUES SUR LA SCHEMATISATION ADOPTEE

La structure qui vient d'être décrite est une conséquence d'hypothèses simplificatrices qui influenceront sur les résultats obtenus.

1) DOMAINE DE SURFACE

La discrétisation en mailles carrées de 37,5 km de côté convient pour la description des quatre grands principaux bassins. Des erreurs importantes sur la superficie peuvent par contre être commises pour les petits bassins tels ceux de la Meuse ou de la Charente. Il aurait fallu utiliser dans ce cas la possibilité de découpage en mailles emboîtées offerte par le modèle.

2) DOMAINE SOUTERRAIN

Deux modes de représentation des transferts d'eau souterraine sont possibles par le modèle couplé, et correspondent à des situations hydro-géologiques distinctes:

- aquifères de grande extension devant la discrétisation de l'espace. Ce type d'aquifère autorise des transferts horizontaux de l'eau sur un grand nombre de mailles et devra ainsi être représenté au moyen d'une couche du domaine souterrain au sens où cela a été défini dans la seconde partie de ce mémoire. C'est le cas de la nappe profonde de l'Albien dans le bassin Parisien ou de celle des Sables Eocènes dans le bassin Aquitain.

- aquifères de faible extension, c'est à dire d'un ordre de grandeur comparable à la taille des mailles de la surface. Dans ce cas, le transfert horizontal souterrain n'est plus à l'échelle du modèle et ne doit pas être simulé. Le rôle de l'aquifère se borne à un rôle de stockage temporaire sur place qui est assuré par le réservoir de transfert souterrain de la fonction production standard du modèle couplé. Cette schématisation a été choisie pour représenter les nappes de la vallée du Rhône et explique l'introduction de fonctions-production particulières (n° 4 et 6) dans cette zone.

Ces deux modes de représentation possibles permettent l'association d'une modélisation conceptuelle ou d'une modélisation globale du domaine souterrain rendant le modèle couplé apte à traiter des problèmes à différentes échelles.

3) CAS PARTICULIER DES NAPPES PHREATIQUES

Dans un pays comme la France, les nappes superficielles sont en relation quasi permanente avec un réseau hydrographique pérenne. Compte tenu du chevelu existant dans le bassin Parisien et de la taille des mailles utilisées (37,5 km de côté), la piézométrie de la nappe phréatique se trouve imposée par le niveau des cours d'eau qui réalisent ainsi l'essentiel du transfert horizontal de l'eau.

Il aurait donc été possible de modéliser cette nappe au moyen de la seconde méthode décrite au paragraphe précédent. La représentation conceptuelle de la première méthode a cependant été retenue en raison de l'existence de l'aquifère profond de l'Albien. Il en est résulté la nécessité d'adopter une transmissivité régionale plus élevée pour tenir compte du transfert local par les cours d'eau non représentés du domaine de surface.

III - LES DONNEES METEOROLOGIQUES

Quatre années de données pluviométriques décennales (1976 à 1979) ont été réunies sur 42 postes pluviométriques, conduisant au découpage en zones météorologiques de la Fig. IV-3.

Les données observées montrent une grande variabilité spatiale s'échelonnant de 620 mm à 2300 mm par an, rendant délicate l'affectation d'une maille de la surface à un poste pluviométrique. A titre d'exemple, la station du Mont Aigoual intéresserait par la méthode des polygones de Thiessen 9 mailles, ce qui conduirait à une forte majoration des écoulements sur le bassin de la Garonne. Ce problème d'interpolation des données pluviométriques n'est pas particulier à l'application du modèle couplé, mais doit être résolu au préalable comme conditionnant l'entrée d'eau dans le système.

L'évapotranspiration potentielle décadaire Penman possède une moins forte variabilité spatiale (600 à 900 mm par an) et a été recherchée en 14 stations.

IV - RESULTATS DES SIMULATIONS

Deux simulations ont été effectuées. La première constitue une tentative de reconstitution des débits à l'exutoire des bassins de la Seine, de la Loire, de la Garonne et du Rhône pendant les années 1976 à 1979. La seconde vise à mettre en évidence l'influence présumée d'un couvert forestier sur le débit de la Seine.

1) RECONSTITUTION DES DEBITS AUX EXUTOIRES

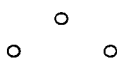
La Fig. IV-4 permet la comparaison, mois par mois, des débits calculés et des débits observés pour la Seine, la Loire, la Garonne et le Rhône (extension française du bassin). Ces valeurs ont été obtenues après quelques essais et un calage fin du modèle n'a pas été recherché. Notre but était de montrer la possibilité d'adaptation du modèle couplé à une très grande échelle et non pas de réaliser l'étude des bassins français. On note cependant une assez bonne restitution des crues et des étiages, surtout pour la Seine et la Loire, bien que des aspects influents tels que la présence de barrages-réservoirs ou de neige aient été totalement négligés.

2) TEST DE L'INFLUENCE D'UNE COUVERTURE FORESTIERE

Pour illustrer l'emploi par le modèle des paramètres physiographiques, a été simulée, sur le bassin de la Seine, l'influence présumée d'un couvert forestier occupant la majeure partie de la superficie. Le résultat obtenu peut donner ainsi un aperçu de ce que pouvait être le débit de la Seine à une époque reculée avant défrichement.

Il a été admis, pour faire cette estimation, que la présence d'une forêt pouvait multiplier par 2 la variation du contenu en eau dans le sol (paramètre CRT des fonctions-productions). Il en résulte un laminage important des crues et, dans une moindre mesure, une diminution des étiages, ce qui est illustré par la Fig. V-5.

Cette application particulière du modèle ne doit être considérée que pour son caractère anecdotique. Pour la rendre plus crédible, il serait nécessaire tout d'abord d'affiner la connaissance pluviométrique pour améliorer le calage, ensuite de disposer d'informations concernant l'influence de la végétation sur la variation du stock en eau dans le sol. L'exemple précédent a cependant l'intérêt de montrer l'accessibilité du modèle à des modifications physiques des bassins, grâce à la représentation conceptuelle qui y est faite.



Dans le présent mémoire, il a été tenté de démontrer comment une représentation conceptuelle du cycle de l'eau sur un bassin versant pouvait être mise en oeuvre à différentes échelles, c'est à dire incluant différents degrés de finesse dans la description des structures. Le modèle couplé a été conçu dans ce but et peut ainsi ouvrir la voie à une foule d'applications pratiques.

Dans une telle modélisation conceptuelle, les contraintes de mise en oeuvre seront liées au rapport entre la question posée et la schématisation nécessaire pour y répondre. La complexité éventuelle d'utilisation du modèle couplé serait donc due à la complexité du problème, et non à celle de l'outil.

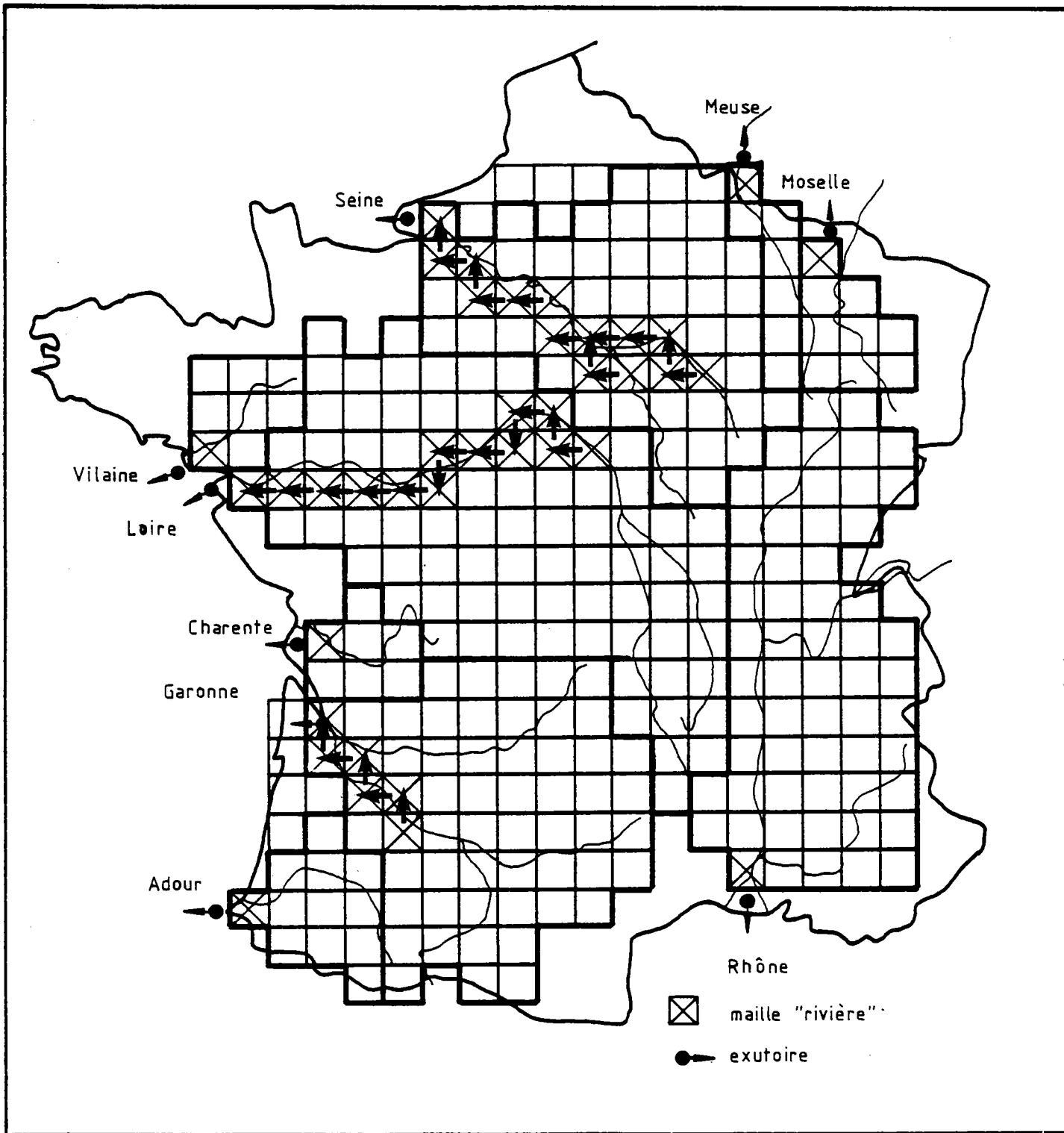


FIG. V-1 - MODELISATION DES ECOULEMENTS DE SURFACE

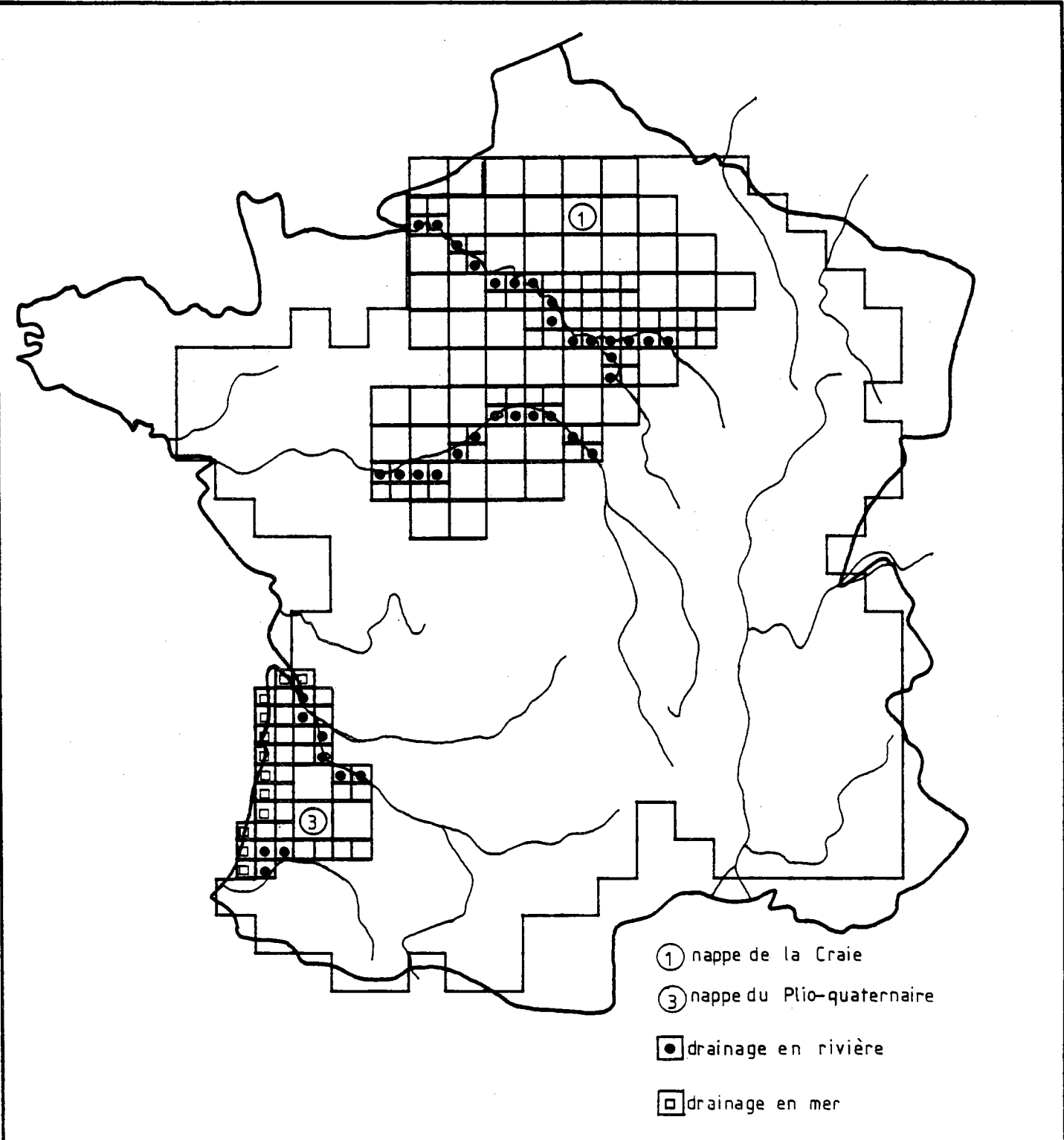


FIG. V-2-1 - MODELISATION DES NAPPES SUPERFICIELLES

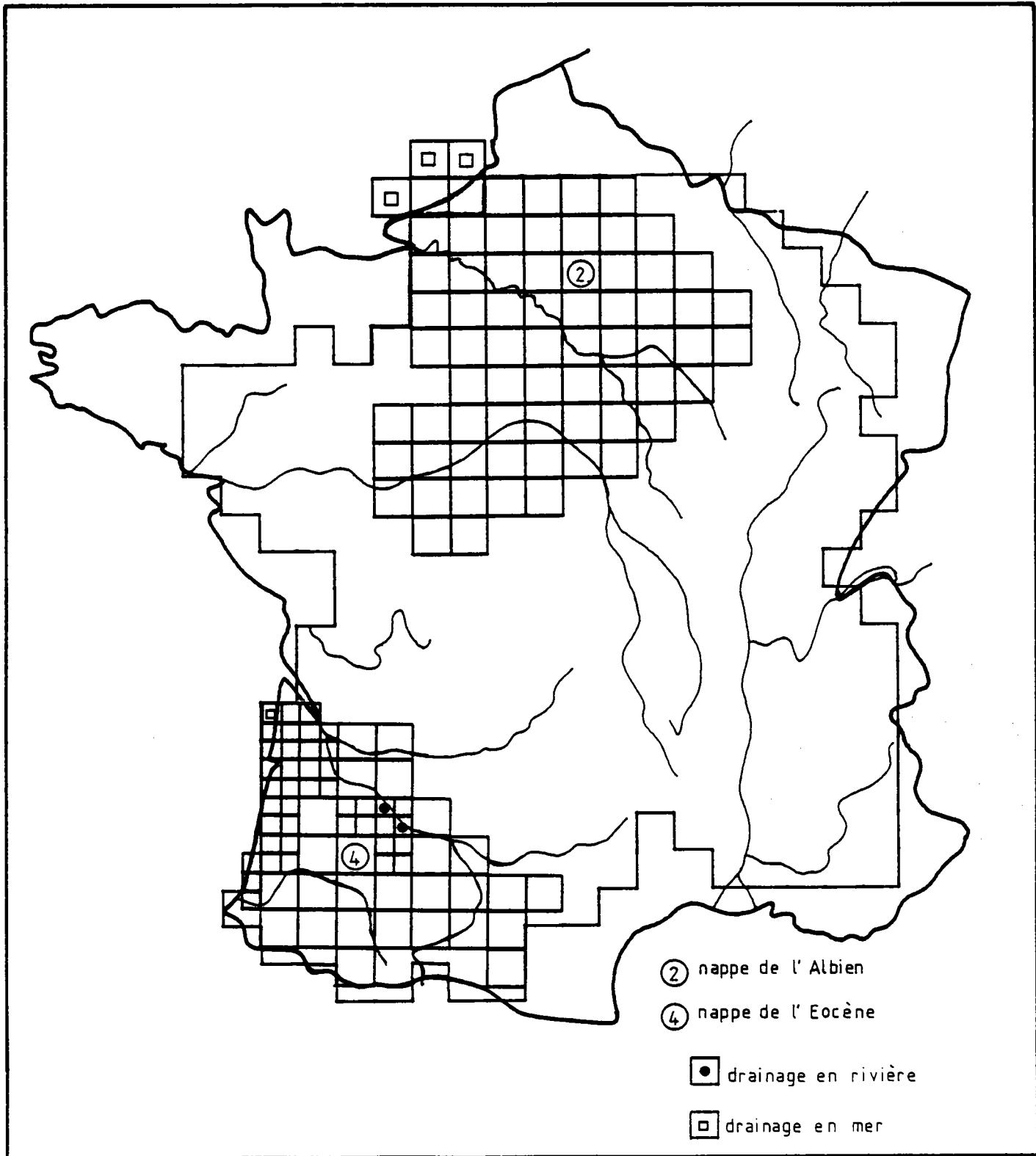
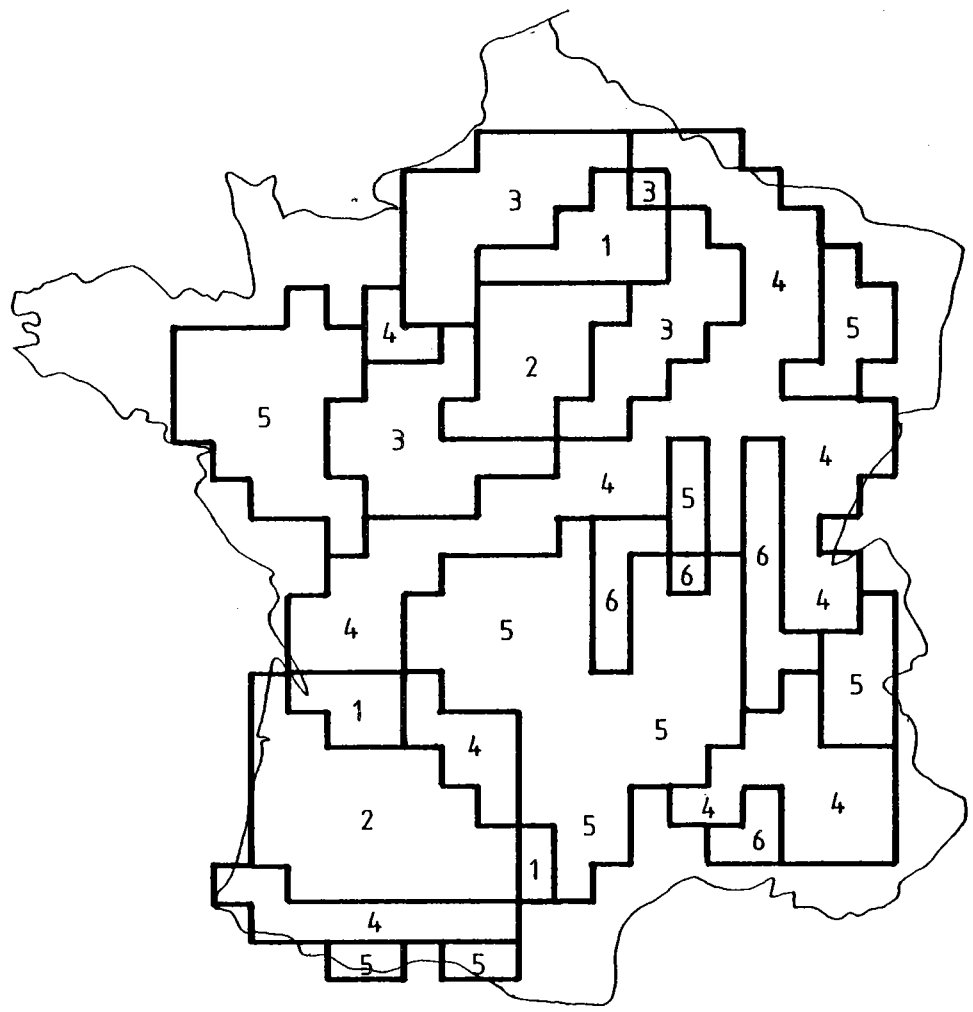
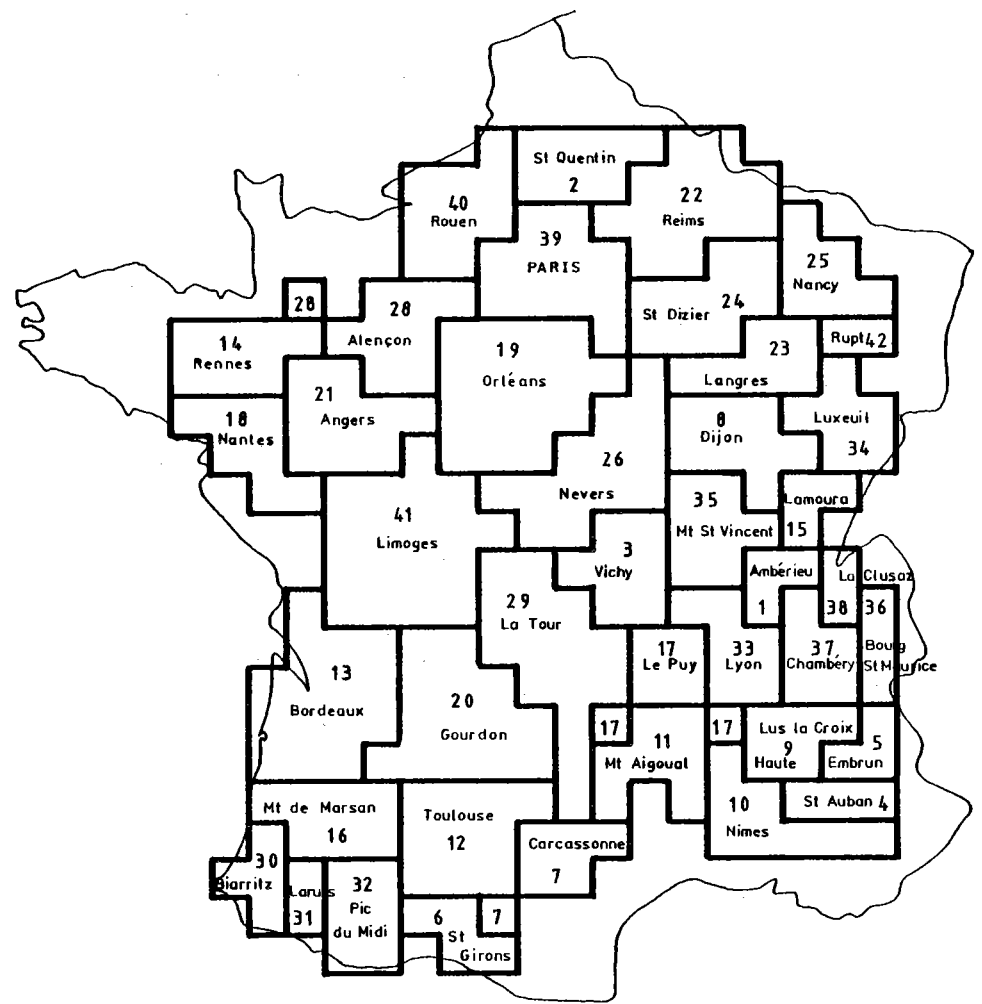


FIG. V-2-2 - MODELISATION DES NAPPES PROFONDES



- | | |
|---------------------------|---------------------|
| 1 Tertiaire perméable | 4 Sol calcaire |
| 2 Tertiaire peu perméable | 5 Sol imperméable |
| 3 Sol crayeux | 6 Sol peu perméable |

Définition des zones de production



Définition des zones météorologiques

FIG. V-3 - DISCRETISATION DES PARAMETRES DU DOMAINE SUPERFICIEL

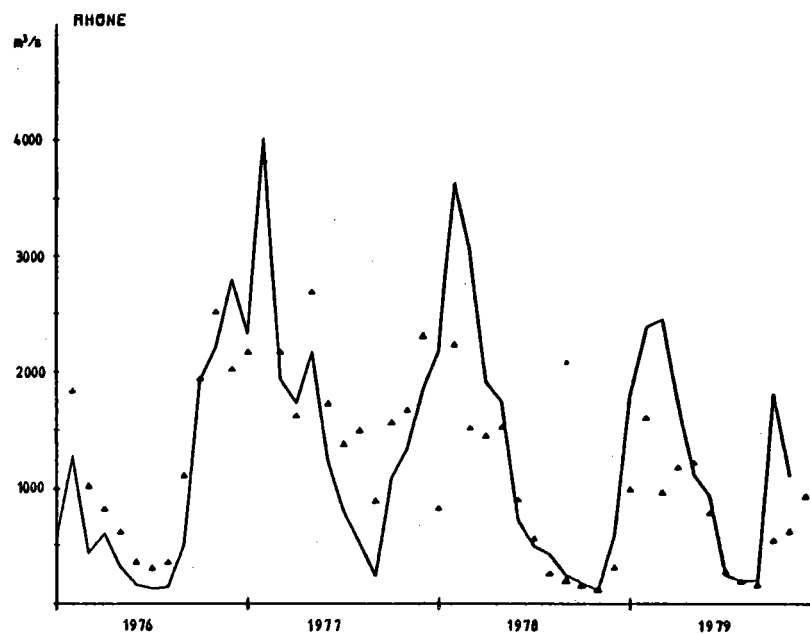
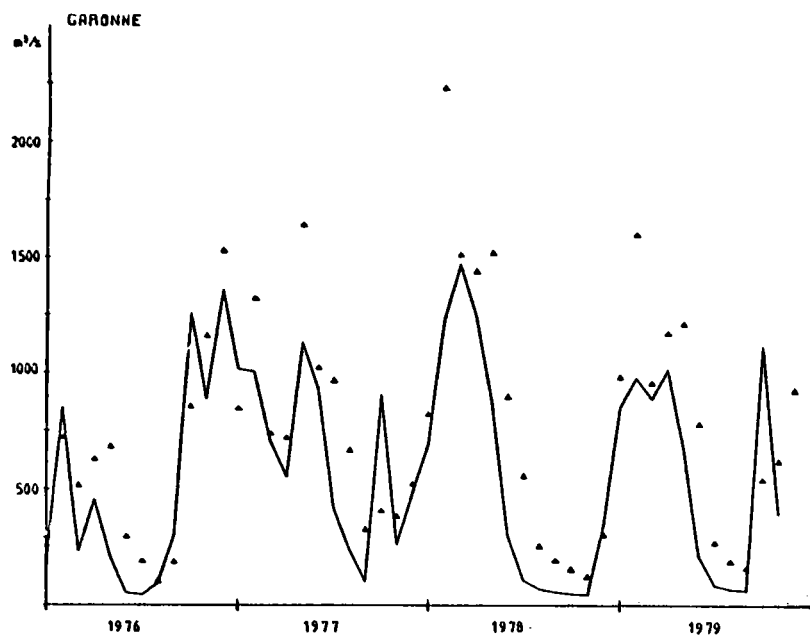
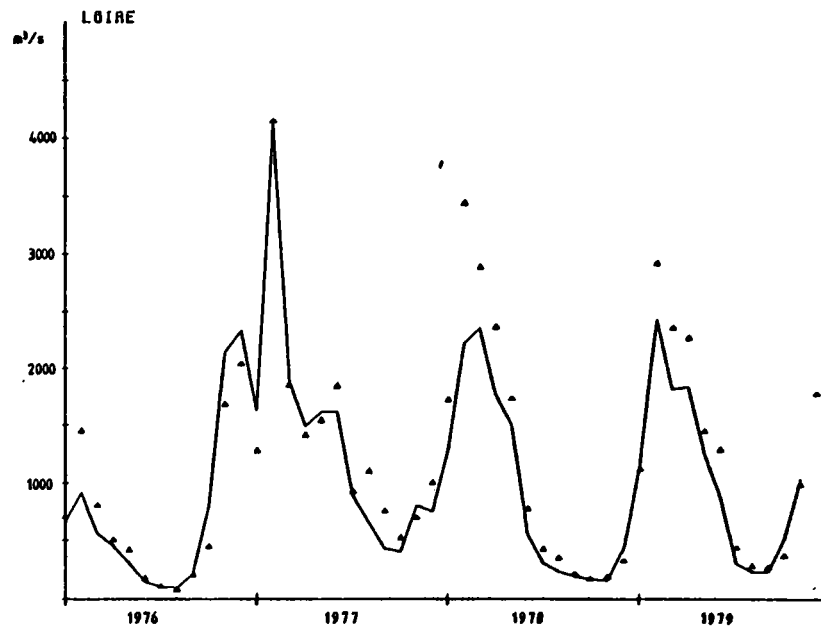
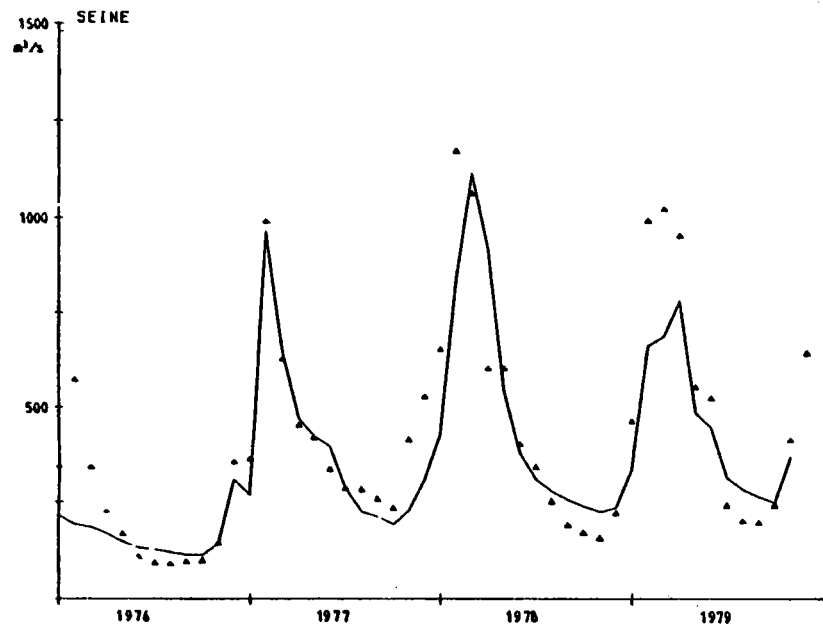


FIG. V-4 - COMPARAISON DES DEBITS CALCULES ET OBSERVES AUX EXUTOIRES DES BASSINS DE LA SEINE, DE LA LOIRE, DU RHÔNE ET DE LA GARONNE

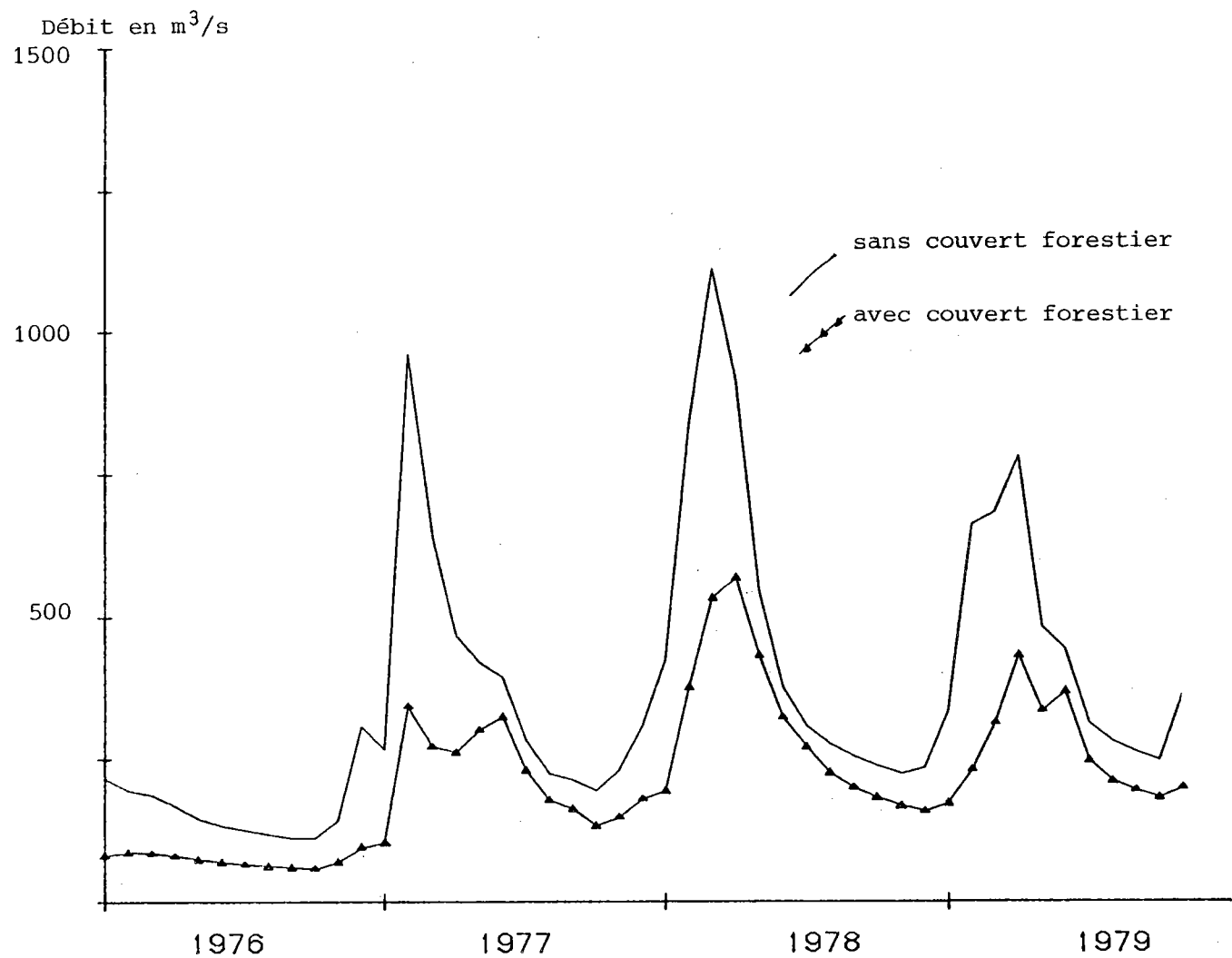


FIG. V-5 - BASSIN DE LA SEINE, INFLUENCE D'UNE COUVERTURE FORESTIERE SUR LE D2BIT A L'EXUTOIRE