

**DIRECTION DÉPARTEMENTALE DE L'AGRICULTURE
D'ILLE - ET - VILAINE**

AMÉNAGEMENT INTÉGRÉ DU BASSIN DU MEU

**Simulation du fonctionnement des divers systèmes
d'alimentation en eau de RENNES**

D8
DUB

OFFICE de la RECHERCHE
SCIENTIFIQUE et TECHNIQUE
OUTRE-MER

SOCIETE d'EQUIPEMENTS RURAUX
S.E.R.

Service Hydrologique

DIRECTION DEPARTEMENTALE de l'AGRICULTURE
d'ILLE et VILAINE

AMENAGEMENT INTEGRE du BASSIN du MEU

SIMULATION du FONCTIONNEMENT des DIVERS SYSTEMES
d'ALIMENTATION en EAU de RENNES

par

Pierre DUBREUIL et Jacques HERBAUD
Directeur de Recherches Maître de Recherches



29 OCT. 1970

D8
DUB

PARIS, Août 1970

10117

S O M M A I R E

Pages

1. Les SYSTEMES d'ALIMENTATION en EAU de RENNES à PARTIR du MEU	2
1.1 Les solutions d'équipement	2
1.2 Caractéristiques d'équipement et contraintes d'exploitation	4
1.2.1 Caractéristiques des retenues	4
1.2.2 Conduites de refoulement et dérivations	6
1.2.3 Débits réservés	6
1.3 Les besoins en eau de l'agglomération rennaise	7
2. La METHODE de SIMULATION et la PREPARATION des DONNEES	7
2.1 La méthode de simulation	7
2.2 La préparation des données	9
2.2.1 Les données hydrologiques	9
2.2.1.1 Les apports annuels	9
2.2.1.2 Le réservoir des formes mensuelles	10
2.2.1.3 La génération des 200 années fictives	12
2.2.1.4 Les débits journaliers du MEU	12
2.2.1.5 L'évaporation	14
2.2.2 Les données d'équipement	14
2.2.2.1 Equations surfaces-volumes des retenues	14
2.2.2.2 Valeurs de la demande globale	15
3. Les PROGRAMMES de SIMULATION	16
3.1 Nature des sorties	16
3.2 Les différents programmes	17
3.3 Organigramme général des programmes	18
3.4 Organigramme du bloc central de programmation	19
3.5 Explications complémentaires sur les variantes du traitement automatique d'une solution d'équipement à l'autre	21
3.6 Commentaire des résultats de la simulation	23
CONCLUSION	27
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	

Le projet d'équipement appelé "RENNES IV" et destiné à subvenir à l'accroissement des besoins en eau de l'agglomération rennaise d'ici à 1985 ou 1990 consiste en l'utilisation des eaux du MEU, affluent de la VILAINE, par pompage direct en saison de hautes eaux et par destockage, lors des basses eaux du MEU, de retenues implantées sur des sites du bassin ou à proximité, dont le remplissage s'effectue soit naturellement par les apports de leurs bassins alimentaires soit par pompage dans le MEU en hiver.

Devant la complexité de ce schéma d'équipement et le fait que plusieurs solutions sont concurrentielles a priori, la Direction Départementale de l'Agriculture d'ILLE et VILAINE a demandé une étude aussi complète que possible des ressources en eau du bassin du MEU, des besoins de RENNES et des usagers du bassin du MEU, enfin une confrontation de ces besoins et des ressources afin que les diverses solutions d'équipement puissent être comparées et qu'un calendrier optimal de construction en découle.

Cette confrontation des ressources et des besoins doit s'effectuer d'abord sur un plan hydrologique ou hydraulique, ensuite sur un plan économique.

La Société d'Equipements Ruraux - SER - a confié par convention à l'ORSTOM la part hydrologique de cette confrontation qui doit être effectuée à l'aide d'un modèle de gestion simulée sur ordinateur des diverses solutions d'équipement envisageables, compte tenu des débits disponibles et des besoins croissants.

L'objectif de cette confrontation hydrologique est de faire ressortir clairement pour chaque solution et chaque niveau des besoins la probabilité de non-satisfaction de ceux-ci, c'est-à-dire le risque de défaillance de chaque solution.

Pour mettre correctement en évidence cette probabilité, il a été jugé nécessaire de procéder à une simulation de fonctionnement durant une période assez longue, pour stabiliser les divers processus, période qui a été choisie d'un commun accord égale à 200 ans.

Pour réaliser cette confrontation hydrologique "ressources - besoins", l'ORSTOM dispose d'informations diverses :

- a) l'étude de la ressource effectuée par la Compagnie Générale des Eaux [1];
- b) l'étude hydrologique complémentaire de la SER dégageant les lois de distribution des modules du MEU et des affluents utilisés [2];
- c) les éléments caractéristiques retenus pour les divers éléments d'équipements (barrages, conduites, stations de pompage), les valeurs de débits réservés et des besoins de RENNES et les contraintes de gestion, toutes données élaborées ou rassemblées par la SER.

Ce rapport rend compte de l'étude de gestion simulée sur 200 ans. Dans un premier chapitre, on expose brièvement les divers systèmes d'alimentation en eau de RENNES à partir du MEU, qu'il nous est demandé de comparer, avec leurs caractéristiques et leurs contraintes; dans un second chapitre, sont exposées la méthode de simulation et les transformations et adaptations faites au préalable sur les données hydrologiques et d'équipement. Le rapport s'achève sur la présentation des programmes de simulation et des résultats obtenus en sortie.

1. Les SYSTEMES d'ALIMENTATION en EAU de RENNES à PARTIR du MEU

Les besoins de RENNES sont tels que pour les dix ou vingt prochaines années le débit naturel du MEU est insuffisant pour les satisfaire. On a donc recherché des sites de retenue pour emmagasiner les eaux excédentaires d'hiver, sur les affluents du MEU, celui-ci n'offrant pas de possibilités intéressantes, et même sur des cours d'eau voisins (CANUT ...).

1.1 Les solutions d'équipement

Une première solution d'équipement a été proposée par la CGE. Puis, la SER en a ébauché trois autres plus complexes et dérivant en partie de la première.

Toutes ces solutions convergent sur la station de pompage de MORDELLES sur le MEU dont la fonction est triple :

- a) refouler directement l'eau du MEU vers RENNES;
- b) refouler pour stockage l'eau excédentaire du MEU vers les retenues;
- c) reprendre les eaux de destockage des retenues pour refoulement vers RENNES quand le MEU est insuffisant par lui-même.

En dehors du tronc commun de refoulement entre MORDELLES et RENNES (station de pompage, conduite, station de traitement), qui évidemment n'a pas à être pris en compte dans la confrontation, les quatre solutions d'équipement (ou systèmes) sont constituées par la composition, dans un certain ordre de construction variable de l'une à l'autre, d'éléments (ou stades) unitaires d'équipement qui sont :

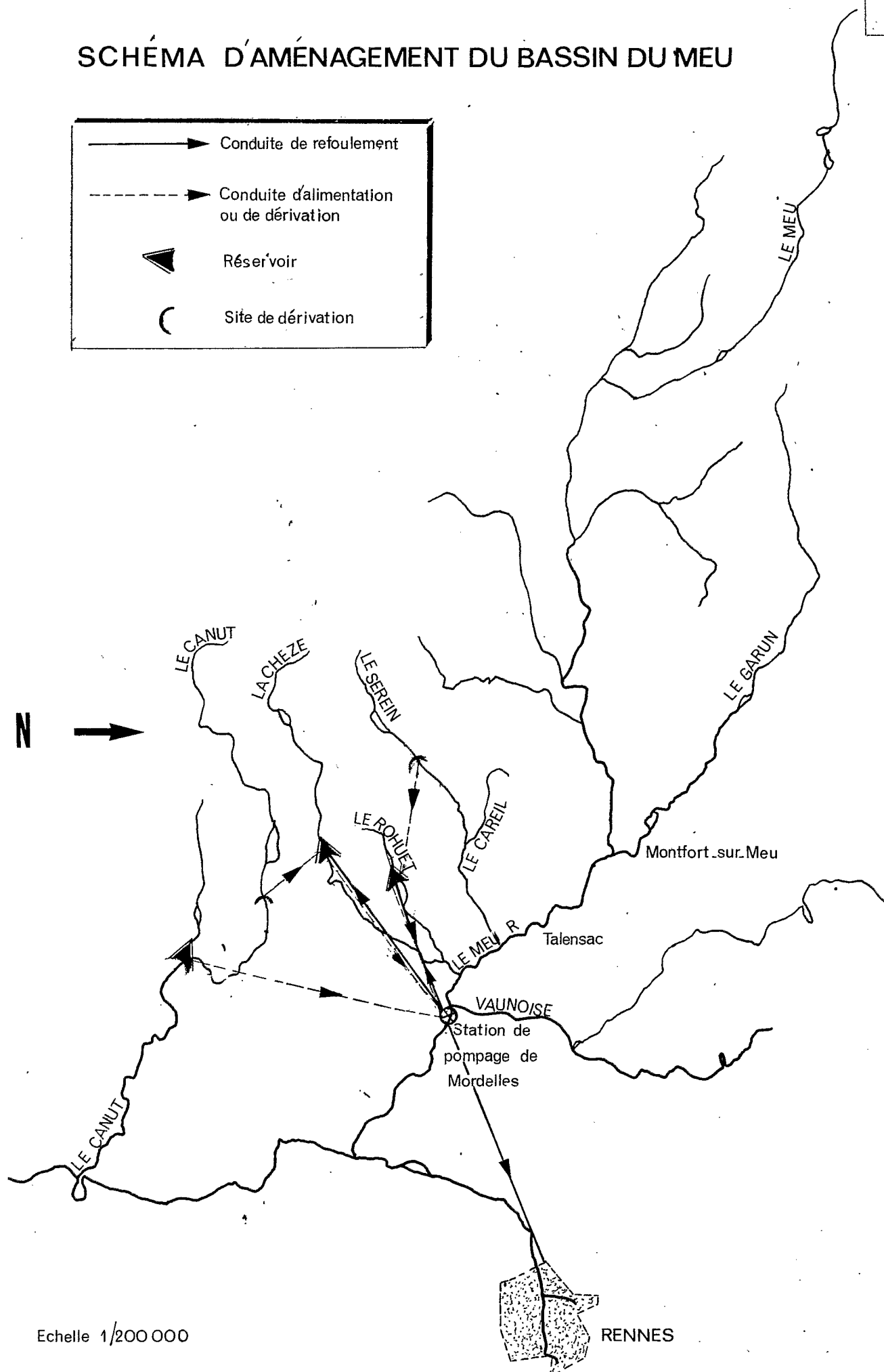
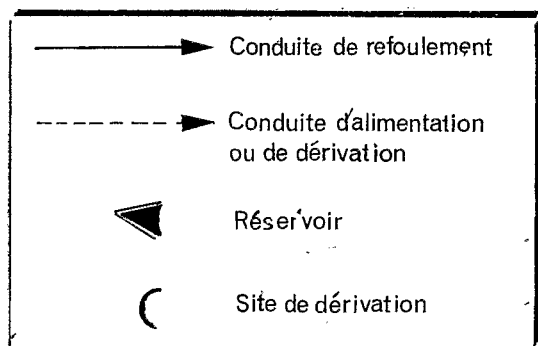
- a) trois retenues sur le CANUT, la CHEZE et le ROHUET;
- b) deux dérivations du HAUT-CANUT et du SEREIN respectivement vers la retenue de la CHEZE et vers celle du ROHUET;
- c) deux conduites de refoulement du MEU à MORDELLES vers les retenues de la CHEZE et du ROHUET.

Tous ces éléments unitaires entrent dans la composition des trois solutions préconisées par la SER, une partie seulement intervient dans la solution de la CGE.

La figure I représente schématiquement tous les éléments unitaires d'équipement sur fond de carte du MEU.

Le tableau n° 1 donne la liste détaillée de composition des quatre solutions d'équipement avec l'ordre de construction des éléments unitaires, chaque rang étant considéré comme un stade d'équipement. La mise en chantier d'un certain stade doit correspondre à une certaine satisfaction des besoins et par conséquent les dates de mise en exploitation des divers stades d'équipement d'une solution dépendent de la quantité des besoins et de l'aptitude de ces stades (associés aux stades déjà construits) à la satisfaire.

SCHÉMA D'AMÉNAGEMENT DU BASSIN DU MEU



Echelle 1/200 000

TABLEAU n° 1

SOLUTIONS et STADES d'EQUIPEMENT

1ère solution			3ème solution		
CHEZE - CANUT - ROHUET			CANUT - CHEZE - ROHUET		
Stade			Stade		
1	CHEZE	RN	1	CANUT	RN
2	CHEZE	RN + D.HC	2	CHEZE	RN
3	CHEZE	RN + D.HC + RF	3	CHEZE RN + D'H.C + RF	
4	CANUT	RN	4	ROHUET + D. SEREIN + RF	
5	ROHUET + D. SEREIN + RF				

2ème solution			4ème solution (C.G.E.)		
CHEZE - ROHUET - CANUT			CHEZE - ROHUET - CANUT		
Stade			Stade		
1	CHEZE	RN	1	CHEZE	RN
2	CHEZE	RN + D.HC	2	CHEZE	RN + RF
3	CHEZE	RN + D.HC + RF	3	ROHUET	RF
4	ROHUET + D. SEREIN		4	CANUT	RN
5	ROHUET + D. SEREIN + RF				
6	CANUT	RN			

RN : remplissage naturel de la retenue
 RF : remplissage complémentaire de la retenue par refoulement depuis le MEU
 D.HC : dérivation du HAUT-CANUT prioritaire vers la retenue de la CHEZE
 D'.HC : dérivation du HAUT-CANUT non prioritaire vers la retenue de la CHEZE
 D. SEREIN : dérivation du SEREIN vers la retenue du ROHUET

Les résultats des simulations de fonctionnement doivent permettre de préciser ces dates et ensuite, par prise en compte des facteurs économiques, il sera possible de comparer les coûts des diverses solutions.

La lecture du tableau n° 1 appelle quelques explications :

- la combinaison de tous les éléments unitaires d'équipements pouvait donner des dizaines de solutions, mais quatre seulement, les plus logiques, ont été conservées;
- les stades d'équipement groupent parfois en une seule phase la construction de plusieurs éléments, simplement parce que l'on a voulu avoir des stades bien différenciés dans leur capacité de satisfaction des besoins afin de permettre une confrontation claire sachant qu'une incertitude règne sur la connaissance des débits et des besoins;
- les eaux du HAUT-CANUT sont dérivées en priorité vers la retenue de la CHEZE tant que le barrage du CANUT n'existe pas (D.HC) et ne le sont après construction de celui-ci que lorsqu'il est plein (D'HC).

Ces divers équipements ont des caractéristiques propres et leur fonctionnement ne peut se faire sans prise en compte d'un certain nombre de contraintes d'exploitation.

1.2 Caractéristiques d'équipement et contraintes d'exploitation

Les caractéristiques d'équipement sont relatives aux retenues, aux conduites de refoulement et aux dérivations.

Les contraintes d'exploitation sont les limites de ces caractéristiques et les débits réservés sur les divers cours d'eau.

1.2.1 Caractéristiques des retenues

Les variations de volumes et de surfaces des retenues en fonction des cotes d'eau sont données dans le tableau n° 2 pour les trois retenues de la CHEZE, du ROHUET et du CANUT telles qu'elles nous ont été communiquées.

Les cotes maximales et minimales d'exploitation de chaque retenue sont également données avec les volumes correspondants. Ces valeurs extrêmes servent à définir les contraintes d'exploitation :

- a) on cesse de refouler l'eau du MEU dans une retenue si elle atteint sa cote maximale;
- b) on cesse de destocker l'eau d'une retenue, en direction de RENNES ou pour maintenir les débits réservés, si son niveau est en dessous de la cote minimale.

Ces contraintes d'exploitation prévalent sur les autres contraintes.

TABLEAU n° 2

RELATIONS HAUTEURS-SURFACES-VOLUMES des RETENUES

Cotes (en m)	Retenue de la CHEZE		Retenue du ROHUET		Retenue du CANUT	
	Surfaces (en 10 ³ m ²)	Volumes (en 10 ³ m ³)	Surfaces (en 10 ³ m ²)	Volumes (en 10 ³ m ³)	Surfaces (en 10 ³ m ²)	Volumes (en 10 ³ m ³)
88	2 059	15 700				
<u>87,5</u>	-	<u>14 750</u>				
86	1 518,5	12 100				
84	1 138,5	9 500				
82	822,7	7 500				
80	724,9	6 000				
78	588,6	4 660				
76	480,5	3 550				
<u>75</u>	-	-	1 263,2	<u>9 890</u>		
74	391,4	2 700	1 077,5	8 720		
<u>73</u>	-	<u>2 330</u>	-	-		
72	313,5	2 000	854,2	6 790	-	25 260
<u>70</u>	246,5	1 430	704,4	5 230	2 779,2	<u>19 140</u>
68	192,6	980	595,6	3 930	2 195,5	<u>14 165</u>
66	145,2	650	482,4	2 850	1 682,3	10 290
64	106,9	400	372	1 997	1 254	7 350
<u>63</u>	-	-	-	<u>1 650</u>	-	-
62	69,6	223	279,5	1 350	929,5	5 170
60	39,9	113	210,3	856	694,2	3 540
<u>59</u>	-	-	-	-	-	<u>2 900</u>
58	21,8	52,4	130	507	505,6	2 345
56	12,5	18	95,5	274	356,2	1 480
54	5,5	5,5	56,7	122	254,8	871
52			25,2	40	163,2	453
50			8,9	6	98,5	191,5

N.B. Les cotes et volumes soulignés correspondent aux limites d'exploitation.

1.2.2 Conduites de refoulement et dérivations

Pour tenir compte de la croissance des besoins en eau, il a été estimé intéressant de tester plusieurs valeurs du débit de refoulement de MORDELLIES vers les retenues : 20, 40 et 60 000 m³/jour. Ces débits sont en fait des capacités de pompage de refoulement et sont introduits dans les programmes sous le nom de variable CAPOMC.

Le fonctionnement des conduites n'est pas entaché d'une autre contrainte que le débit maximal donné par CAPOMC. Ainsi, il est admis que le débit de destockage qui emprunte la même conduite que celui de refoulement est toujours compatible avec le dimensionnement de la conduite.

Les dérivations du SEREIN vers le ROHUET et du CANUT vers la CHEZE sont supposées sans limitation de débits; c'est-à-dire que les ouvrages sont calibrés pour absorber tous les débits courants à l'exception des pointes de crues de quelques heures, dont le volume est négligeable ici.

1.2.3 Débits réservés

Il a été décidé de maintenir le débit du MEU en aval de MORDELLIES et des trois affluents en aval des barrages, par lâchures depuis ceux-ci tant que la contrainte de cote minimale n'est pas atteinte.

Pour le MEU, il a été demandé d'expérimenter trois valeurs possibles du débit réservé pour tenir compte d'éventualités de développement (besoins croissants du cours inférieur du MEU, lutte contre la pollution, renforcement de l'étiage de la VILAINE ...): 10, 30 et 50 000 m³/jour.

Pour les affluents, on a seulement une valeur du débit réservé :

CHEZE	1 000 m ³ /j
ROHUET	250 m ³ /j
CANUT	3 000 m ³ /j

Pour les équipements de dérivation, sans retenue, on a admis comme contrainte de laisser un débit réservé, évidemment non maintenu, égal à :

700 m³/j à la prise du SEREIN
2 000 m³/j à la prise du HAUT-CANUT

En exploitation, on ne prélève d'eau dans les dérivations qu'au-dessus de ces débits réservés laissés.

Par mesure de sécurité, on considère que le débit à laisser (2 000 m³/j) ou effectivement laissé (moins de 2 000 m³/j quand il y a un débit inférieur d'apport) en aval de la dérivation du HAUT-CANUT est consommé avant la retenue du CANUT.

On retire donc ce débit du débit d'apport à la retenue dans les programmes de simulation.

1.3 Les besoins en eau de l'agglomération rennaise

La croissance des besoins en eau de RENNES au-delà de 1970 a été estimée selon une hypothèse haute et une hypothèse basse.

Il nous a été demandé de tester les systèmes d'équipement pour diverses valeurs régulièrement espacées sur ces courbes de croissance, et qui figurent dans le tableau ci-dessous :

<u>Millions de m³/an</u>	<u>Milliers de m³/jour</u>
10	27,5
15	41
20	55
30	82,5
40	110
55	151
65	178
90	247

2. La METHODE de SIMULATION et la PREPARATION des DONNEES

La confrontation hydrologique des quatre systèmes proposés pour alimenter RENNES en eau va être développée en s'appuyant sur un fonctionnement simulé de ces systèmes durant une période fictive de 200 ans.

On présente d'abord la méthode retenue pour ce fonctionnement simulé, abstraction faite des logiques de programmes qui sont exposées au chapitre 3. Puis, on procède à la préparation des données hydrologiques et d'équipement qui doivent être élaborées pour entrer dans la simulation.

2.1 La méthode de simulation

Etant donné qu'il y a plusieurs hypothèses pour trois variables : les besoins de RENNES (8 valeurs), le débit réservé du MEU (3 valeurs) et la capacité de refoulement vers les reternues (3 valeurs), on est contraint de diviser chaque stade d'équipement en plusieurs étapes d'exploitation, chacune d'elles étant définie par les caractéristiques du stade d'équipement et une valeur fixe pour chacune des trois variables précitées.

Chaque étape d'exploitation représente un certain stade d'équipement (la capacité de refoulement est une variable d'équipement) en face d'une certaine demande (somme des besoins de RENNES et du MEU aval). Pour tester la qualité de cette étape d'exploitation, on cherche à mettre en évidence la défaillance ou non-satisfaction des besoins en procédant à la simulation du fonctionnement à l'aide d'une série fictive de débits du MEU et des affluents, longue de 200 ans.

Ce fonctionnement de 200 ans d'une étape d'exploitation constitue le noyau de la méthode d'analyse et également le noyau des programmes de calcul sur ordinateur. Ce noyau opère selon une base de calcul mensuel et les résultats sont comptabilisés à l'année.

Théoriquement, la méthode consiste à explorer toutes les étapes d'exploitation d'un certain stade, puis à passer au stade suivant jusqu'à achèvement de la solution étudiée.

Comme il y a théoriquement $8 \times 3 \times 3$ soit 72 étapes par stade, on a fait appel à des procédés logiques de sélection afin de n'explorer que des étapes intéressantes (Cf. 2.2), certaines apparaissant évidemment comme trop défaillantes. Ainsi, a-t-on adopté une contrainte concernant le seuil maximal de défaillance admissible, au-delà duquel un stade d'équipement ne peut absolument pas convenir pour satisfaire la demande à laquelle il est confronté. Ce seuil a été choisi égal à une probabilité de défaillance de 10 %; en pratique, il correspond à l'apparition d'au moins vingt défaillances annuelles d'un minimum de 10 jours durant la période simulée de 200 ans.

En première approximation, la mise en oeuvre de ce seuil de défaillance permet déjà de définir une articulation des diverses simulations; en effet, on peut opérer le passage d'une étape d'exploitation à la suivante et d'un stade d'équipement au suivant selon le processus que voici :

- a) on commence par le stade supérieur de chaque solution correspondant à l'équipement complet de celle-ci et l'on confronte celui-ci avec une demande croissante;
- b) le "clignotant" du seuil de défaillance stoppe la croissance des valeurs de demande, donc le passage à l'étape supérieure, pour un même stade;
- c) la descente à un stade inférieur n'a lieu, pour une certaine demande, que si celle-ci a été satisfaite au stade supérieur (seuil de défaillance non atteint).

L'ordre de présentation des résultats mis à part, on retrouvera cette articulation dans les données de sortie de l'ordinateur.

Dans la simulation de fonctionnement d'une certaine solution, on obtient des défaillances plus ou moins élevées pour les divers stades d'équipement et étapes d'exploitation confrontés. L'examen ultérieur de ces résultats doit permettre de choisir l'échéancier optimal de mise en service des divers stades d'équipement puisqu'aux étapes d'exploitation "satisfaites" par ceux-ci correspondent des valeurs de la demande qui, selon l'hypothèse de croissance des besoins de RENNES choisie, sont censées être nécessaires à partir d'une certaine date.

La comparaison, sur le plan économique, des résultats des quatre solutions doit dégager les différences de coûts entre elles, compte tenu des degrés de satisfaction atteints (ou de non-défaillance).

A côté de la contrainte du seuil de défaillance, la méthode de simulation a besoin d'une seconde contrainte relative à l'ordre d'appel des équipements pour la fourniture de la demande.

Cet ordre d'appel est le suivant :

- 1. Le MEU
- 2. Si le MEU ne suffit pas, appel dans l'ordre de mise en service, des stades d'équipements.

Ainsi, dans la solution 3 par exemple (Cf. tableau n° 1), en cas d'insuffisance du MEU, les besoins non satisfaits sont recherchés d'abord dans le réservoir du CANUT puis, si celui-ci est également incapable de fournir cette demande résiduelle, sans atteindre sa cote minimale, dans celui de la CHEZE ... etc...

Bien entendu, cette contrainte de l'ordre d'appel des équipements est un choix simple pour faciliter la simulation, mais en gestion réelle elle serait insuffisante. On pourrait alors appeler tout ou partie des retenues en fonction de leur degré de remplissage et de la prévision des apports pour les mois à venir, et en tenant compte du coût plus ou moins élevé de l'eau emmagasinée dans ces retenues ... etc ... Mais ceci est hors de notre propos.

2.2 La préparation des données

Les données hydrologiques (apports annuels, répartition mensuelle, évaporation) et les données d'équipement (relations hauteurs-surfaces-volumes des retenues, valeurs de la demande) doivent subir quelques transformations pour être introduites dans les programmes de simulation sous des formes adéquates et assimilables.

2.2.1 Les données hydrologiques

2.2.1.1 Les apports annuels

Nous rappelons les lois de distribution supposées normales des apports annuels du MEU et des affluents intéressés [2] :

: Bassin d'alimentation	: Module moyen	: Ecart-type	:
:	: L (mm)	: (mm)	:
: MEU à MORDELLES	: 250	: 100	:
: CHEZE et HAUT-CANUT	: 275	: 120	:
: SEREIN et ROHUET	: 275	: 120	:
: CANUT	: 265	: 115	:

La note [2] indique également que ces moyennes ne sont pas connues à mieux de $\pm 17\%$ près dans un intervalle de confiance à 90 % et qu'il n'est pas absolument certain que les distributions soient rigoureusement normales, les échantillons admettant de forts coefficients de variation (0,40 et 0,45).

On a décidé, avant de procéder au tirage au hasard des 200 années fictives dans ces lois de distribution, deux modifications :

- a) de les exprimer en milliers de m^3 /jour, unité d'apport A et base des calculs de simulation, sachant que :

$$A = \frac{L \cdot S}{365}$$

S étant la superficie du bassin d'alimentation en km^2 ;

- b) de les limiter pour les fortes probabilités au dépassement à une valeur constante prise :
- nulle pour les affluents ($P \geq 0,99$)
 - égale à $25.10^3 m^3/j$ pour le MEU ($P \geq 0,99$)
- ceci afin d'éviter l'absurdité des valeurs négatives (ou trop faibles ou nulles pour le MEU) lors du tirage au sort.

2.2.1.2 Le réservoir des formes mensuelles

La note [2] indique qu'après quelques estimations de mois d'été non observés, on peut disposer pour le MEU à TALENSAC et MONTFORT de 6 années de débits moyens mensuels (1964-1969) et pour la CHEZE à St-THURIAL de 7 années (1963-1969).

La même note montre aussi que les hydraulicités du MEU et de la CHEZE sont assez voisines.

On a calculé pour la période commune d'observations de 6 ans les coefficients mensuels de débit du MEU et de la CHEZE obtenus en divisant les débits moyens mensuels de chaque année par le module de celle-ci. Le tableau n° 3 donne ces coefficients. On constate une certaine liaison entre coefficients du MEU et de la CHEZE pour des mois correspondants.

Aussi peut-on admettre que d'une part les hydraulicités sont les mêmes, d'autre part les répartitions mensuelles apparaissent toujours liées comme elles le sont au cours d'une des 6 années d'observations simultanées des deux cours d'eau.

En conséquence, lors du tirage au sort des modules d'années fictives, il est également tiré au sort, par année, un seul chiffre de 1 à 6 qui désigne pour le MEU comme pour la CHEZE la répartition mensuelle du module tiré. Ces chiffres désignent les réservoirs de formes mensuelles que constituent les coefficients de débits du tableau n° 3.

Cependant, une contrainte supplémentaire est à introduire : le réservoir de forme n° 3, dû à l'année très abondante 1966, est obligatoirement affecté aux forts modules du tirage au sort, supérieurs à $700.10^3 m^3/j$ pour le MEU et $36.10^3 m^3/j$ pour la CHEZE, valeurs correspondantes à des probabilités inférieures à 0,12.

Les réservoirs de forme sont seulement tirés au sort pour les modules plus faibles et parmi les 5 valeurs restantes. Par manque d'information (observations du SEREIN en 1969 et rien d'autre), on décide d'adopter le réservoir de formes de la CHEZE pour tous les affluents, et la même règle d'hydraulicité (même numéro tiré, cas particulier de la forme n° 3).

TABLEAU n° 3

RESERVOIRS de FORMES MENSUELLES

(Débits moyens mensuels divisés par le module)

1. MEU à TALENSAC/MONTFORT

: Année :	Janvier :	Février :	Mars :	Avril :	Mai :	Juin :	Juillet :	Août :	Septembre :	Octobre :	Novembre :	Décembre :	N° :
: 1964 :	0,85 :	2,31 :	2,75 :	1,56 :	0,75 :	1,94 :	0,22 :	0,19 :	0,23 :	0,14 :	0,15 :	0,97 :	1 :
: 1965 :	2,85 :	1,40 :	1,75 :	0,70 :	0,37 :	0,43 :	0,32 :	0,22 :	0,23 :	0,15 :	0,91 :	2,61 :	2 :
: 1966 :	1,36 :	1,68 :	0,31 :	0,29 :	0,49 :	0,23 :	0,40 :	0,38 :	0,29 :	1,44 :	2,21 :	2,88 :	3 :
: 1967 :	2,69 :	2,52 :	2,30 :	0,98 :	1,08 :	0,44 :	0,09 :	0,04 :	0,07 :	0,16 :	0,59 :	1,09 :	4 :
: 1968 :	3,11 :	3,06 :	1,26 :	1,45 :	0,70 :	0,29 :	0,08 :	0,06 :	0,04 :	0,35 :	0,46 :	1,18 :	5 :
: 1969 :	2,51 :	2,96 :	2,64 :	0,64 :	0,90 :	0,61 :	0,15 :	0,03 :	0,03 :	0,01 :	0,28 :	1,32 :	6 :

2. CHEZE à St-THUPIAL (formes valables pour CANUT, ROHUET et SEREIN)

: 1964 :	1,07 :	2,47 :	4,87 :	1,53 :	0,53 :	0,60 :	0,07 :	0 :	0 :	0 :	0 :	1,00 :	1 :
: 1965 :	2,79 :	1,04 :	2,46 :	0,63 :	0,33 :	0,29 :	0,01 :	0 :	0 :	0,08 :	0,96 :	3,25 :	2 :
: 1966 :	1,60 :	2,38 :	0,77 :	0,55 :	0,53 :	0,26 :	0,05 :	0 :	0 :	2,98 :	1,70 :	1,40 :	3 :
: 1967 :	1,70 :	4,53 :	2,41 :	0,94 :	0,65 :	0,24 :	0,01 :	0,29 :	0,04 :	0,12 :	1,12 :	0,47 :	4 :
: 1968 :	2,39 :	1,53 :	0,75 :	2,51 :	0,84 :	0,40 :	0,05 :	0 :	0,10 :	1,27 :	0,48 :	1,70 :	5 :
: 1969 :	2,82 :	2,82 :	3,20 :	0,43 :	0,42 :	0,22 :	0,04 :	0 :	0,01 :	0 :	0,36 :	1,63 :	6 :
: :	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:

2.2.1.3 La génération des 200 années fictives

Elle est assurée à l'aide des lois de distribution et des réservoirs de formes mensuelles tels qu'ils viennent d'être présentés.

Seule, la distribution de la CHEZE est employée pour tous les affluents, les apports de chacun étant ensuite calculés d'après ceux de la CHEZE au prorata des surfaces drainées puisque les lois de distribution admettent toutes le même coefficient de variation (0,45). Ce calcul n'est d'ailleurs fait que dans les programmes de simulation, à l'aide des variables CØEF (K) qui, indicées selon le numéro du bassin d'alimentation, sont des données d'entrées.

Le programme de génération PØH 613 s'appuie sur les sous-programmes du répertoire ORSTOM [3] :

- PØH 002 FUNCTION VNØRM qui calcule la valeur de la variable dans une distribution normale à partir de la valeur de la fréquence au non-dépassement;
- PØH 040 FUNCTION ALGENE (KAPPA) qui génère des nombres pseudo-aléatoires en distribution uniforme à l'aide d'une relation de congruence.

On obtient en sortie, sur cartes perforées, les 12 débits moyens mensuels et le module du MEU et de la CHEZE pour les 200 années de fréquences tirées au hasard par le PØH 040. Ces données constituent une entrée des programmes de simulation, sous les noms de variables DMEU (N, M) et DCH (N, M), N variant ici de 1 à 200 et M de 1 à 12.

Une sortie sur imprimante nous a permis de contrôler que les échantillons ainsi créés ne présentaient aucune distorsion avec les lois de distribution (excès de valeurs extrêmes) pouvant déformer les résultats de la simulation.

2.2.1.4 Les débits journaliers du MEU

L'examen des hydrogrammes du MEU montre une dispersion notable des débits journaliers de part et d'autre du débit moyen mensuel.

La base de calcul de simulation ayant été choisie mensuelle, cette dispersion peut, si elle n'est pas prise en compte, cacher certaines causes de défaillances.

En effet, si l'on appelle Q_m le débit moyen d'un mois et B_m le besoin correspondant, on peut avoir $Q_m > B_m$ et même $Q_m > B_m + \text{CAPØM}$ et cependant le risque de défaillance peut exister sur deux plans :

- a) certains jours du mois le débit Q_j peut être inférieur à B_m et dans ce cas le MEU ne suffit pas;
- b) d'autres jours, à l'opposé, le débit $(Q_j - B_j)$ est très supérieur à CAPØM alors CAPØM va limiter le refoulement vers les retenues.

Pour éviter l'omission de ces défaillances momentanées qui entraîneraient certainement des distorsions dans la simulation et peut-être de vraies défaillances dans la satisfaction de la demande, on a décidé de prendre en compte la répartition journalière des débits autour de la moyenne mensuelle, ces débits étant supposés classés.

A partir des 6 années de relevés à TALENSAC et MONTFORT sur le MEU, on a classé les débits journaliers de chaque mois ayant été totalement observé. On a ensuite remplacé ces débits par les coefficients journaliers de débit K obtenus en divisant ces débits journaliers par le débit moyen mensuel.

Ces coefficients K ont été reportés sur l'ordonnée logarithmique d'un graphique en fonction de leurs rangs, exprimés en nombres de jours J pendant lesquels ils sont dépassés et portés eux en abscisse à échelle arithmétique. Pour chaque mois, il a été possible de tracer une droite au milieu des points représentant log K en fonction de J, la dispersion restant modérée autour de celle-ci. On a alors constaté que la loi de décroissance des coefficients journaliers de débits classés était sensiblement la même pour certains mois, et l'on a finalement retenu trois équations caractérisant trois groupes de mois.

Ces équations, qui sont de la forme :

$$\log K = -A J + \log \beta$$

sont utilisées dans les programmes de simulation sous la forme :

$$K = \beta e^{-\alpha J}$$

Les variables $\beta(M)$ et $\alpha(M)$ sont des données d'entrée et sont indicées en mois.

Du fait du nombre total de jours variables d'un mois à l'autre, les coefficients β varient légèrement pour que le total des débits journaliers reste bien égal au débit moyen mensuel multiplié par le nombre de jours du mois.

DECROISSANCE des COEFFICIENTS K des DEBITS JOURNALIERS CLASSES

Groupe de mois	Equation de décroissance de K en J	Valeurs extrêmes approchées de K dans le mois
Janvier-Mars Mai-Octobre Février	$K = 2,037 e^{-0,053 J}$ $K = 1,929 e^{-0,053 J}$	1,77 - 0,40
Avril-Septembre Juillet-Août	$K = 1,403 e^{-0,024 J}$ $K = 1,417 e^{-0,024 J}$	1,35 - 0,68
Novembre Décembre	$K = 2,589 e^{-0,078 J}$ $K = 2,655 e^{-0,078 J}$	2,20 - 0,25

Ces équations servent à moduler le débit moyen mensuel du MEU en début de simulation. A la lecture des valeurs extrêmes mensuelles moyennes de K, on peut juger de l'intérêt de cette correction puisque les écarts vont de 1 à 2 en mois de basses eaux et de 1 à 9 en mois de hautes eaux.

2.2.1.5 L'évaporation

Pour estimer l'évaporation des nappes d'eau libre des diverses retenues, nous disposons des éléments d'information suivants :

- a) des hauteurs mensuelles d'évaporation sur bac de classe A à RENNES-St-JACQUES-la-LANDE d'Avril à Octobre, de 1964 à 1969;
- b) des hauteurs mensuelles évaporées au PICHE sous abri de 1946 à 1954 à RENNES-St-JACQUES-la-LANDE.

Nous avons également utilisé, à titre de recoupement et de contrôle, les observations effectuées sur bassins représentatifs :

- c) à ALRANCE -Massif Central - de 1951 à 1963 sur bac Colorado, sur bac de 4 m² et sur PICHE;
- d) à l'ORGEVAL - région de PARIS - de 1964 à 1969 sur bac ORSTOM.

Par application d'un coefficient de passage voisin de 0,90 entre l'évaporation sur bac et sur retenue, nous avons extrait de ces diverses sources d'informations des valeurs moyennes mensuelles cohérentes de l'évaporation applicables aux retenues :

Janvier	20 mm	Juillet	120 mm
Février	25 mm	Août	95 mm
Mars	55 mm	Septembre	55 mm
Avril	65 mm	Octobre	35 mm
Mai	80 mm	Novembre	30 mm
Juin	100 mm	Décembre	20 mm

Le total annuel est égal à 700 mm.

On a admis que la variabilité interannuelle du phénomène était négligeable et qu'il suffisait de retenir les valeurs moyennes, eu égard à la précision sur la connaissance des apports.

Les douze valeurs d'évaporation sont introduites dans les programmes sous la forme d'un vecteur EVAP (M) indicé en mois.

2.2.2 Les données d'équipement

2.2.2.1 Equations surfaces-volumes des retenues

Les volumes limites d'exploitation sont utilisés à la place des cotes limites et l'on se contente des volumes et des surfaces, sans introduire les cotes. On a en effet trouvé que pour chaque retenue, il existait une liaison linéaire, formée d'un ou plusieurs segments de droite, entre les logarithmes des volumes et ceux des surfaces :

$$\text{Log } S = A \log V + B$$

On introduit donc simplement les volumes limites d'exploitation VMAX et VMIN et les paramètres A et B des liaisons surfaces-volumes.

La simulation opère en volumes et il est fait appel aux surfaces pour le calcul de l'évaporation, au début de chaque mois. On introduit également SMAX comme limite pour ce calcul.

2.2.2.2 Valeurs de la demande globale

Avec 8 valeurs de besoins en eau de RENNES et 3 valeurs possibles pour le débit réservé à maintenir dans le MEU en aval de MORDEILLES, on aurait 24 paliers de la demande globale.

Pour réduire ces paliers, on a fait deux hypothèses :

- la simulation indiquant certaines années s'il y a défaillance compte tenu de la demande globale, pourra omettre de donner à cette occasion une priorité à RENNES sur le MEU, ou l'inverse et d'"affecter" la défaillance en totalité ou en partie à l'une ou à l'autre des demandes; la répartition des besoins entre RENNES et le MEU n'est donc pas, dans ces conditions, une donnée susceptible de modifier les résultats de la simulation;
- les valeurs globales des paliers doivent être au moins différentes de 10 %, car autrement, étant donné l'imprécision sur les apports, il est impossible d'attribuer une signification aux écarts entre les résultats de simulation de deux paliers trop voisins.

Nous avons retenu en définitive seulement 13 paliers de la demande globale "RENNES + MEU aval" qui figurent dans le tableau suivant, rangés par ordre croissant de la demande de RENNES et en trois colonnes selon qu'ils résultent de l'addition d'un débit réservé de 10 000 (col. 1), 30 000 (col. 2) ou 50 000 m³/j (col. 3).

PALIER RETENUS pour la DEMANDE GLOBALE
(10³ m³/jour)

:		:		:		:
:	37,5	:	57,5	:	-	:
:	-	:	71	:	-	:
:	-	:	85	:	-	:
:	-	:	112,5	:	-	:
:	-	:	140	:	160	:
:	-	:	181	:	-	:
:	-	:	208	:	228	:
:	257	:	277	:	297	:
:		:		:		:

Les programmes lisent en entrée 8 valeurs des besoins en eau de RENNES DERENC et 3 valeurs de débit réservé du MEU DRESMC qu'une variable spéciale JECØ permet ensuite d'associer pour ne retenir que les 13 paliers précédents sur les 24 possibles.

3. Les PROGRAMMES de SIMULATION

La méthode de simulation ayant été exposée au chapitre précédent ainsi que les formes sous lesquelles les diverses données hydrologiques et d'équipement devaient être présentées en "entrées" de programmes, il suffit de définir la nature des "sorties" désirées pour pouvoir dresser l'organigramme général de ces programmes. Le bloc central de programmation (boucle DØ 699), relatif à la simulation proprement dite des 200 ans, à l'échelle du mois, est présenté avec un peu plus de détails en fin de chapitre.

3.1 Nature des sorties

Pour permettre une comparaison complète des résultats de simulation entre les solutions et au sein de celles-ci entre les stades d'équipement, on a envisagé la sortie du plus grand nombre possible d'éléments intéressants.

Ces éléments sont de trois types :

- a) le premier concerne l'écoulement dans le MEU et les autres cours d'eau : d'une part, module du MEU exprimé en milliers de m^3/j (titre de colonne : MODULE), d'autre part, volume total écoulé à l'aval des aménagements, c'est-à-dire de MORDELLIES et éventuellement du barrage du CANUT, compte tenu des apports des bassins équipés (résultat, indiqué dans la colonne intitulée AVAL, qui permet par comparaison avec l'ensemble des débits réservés, de juger des excédents non refoulés vers les barrages ni retenus au passage par ceux-ci, ni utilisés pour RENNES);
 - b) le second contient les bilans des retenues :
 - quantité d'eau refoulée vers une retenue, (titre de colonne REF 1, ou REF 2, ou REF 3 selon le n° de la retenue dans l'ordre de mise en place des équipements),
 - quantité d'eau destockée des retenues, soit pour RENNES, soit pour le soutien du débit réservé du MEU (DEST 1, 2 ou 3),
 - nombre de jours de destockage, qui figure entre parenthèses après DEST,
 - quantité d'eau évacuée en aval des retenues (titre de colonne : AV 1, 2 ou 3).
- Les trois premières données permettent des calculs de coût, la dernière a le même sens que AVAL pour l'ensemble des aménagements; elle est la somme du débit réservé en aval de cette retenue et du débit déversé (retenue pleine);
- c) le troisième fait référence aux défaillances du stade d'équipement face au palier de la demande globale à laquelle il est confronté, exprimées :
 - en volume défaillant (DEF),
 - en nombre de jours de durée de la défaillance, indiqué entre parenthèses après DEF.

Une troisième information de défaillance est inscrite en sortie (colonnes DAD qui viennent après AV 1, 2 ou 3); c'est le volume de la défaillance en aval du site de dérivation (HAUT-CANUT ou SEREIN) quand le débit à laisser ne peut l'être, c'est-à-dire le volume manquant pour que ce débit laissé puisse être maintenu.

Toutes les données de sortie, en volumes, comme les calculs internes de la simulation, sont en milliers de m³.

3.2 Les différents programmes

Nous avons été amenés à faire des programmes différents pour traiter les quatre solutions d'équipement pour deux raisons :

- a) l'existence ou l'absence de dérivation d'un bassin vers un autre;
- b) l'ordre d'appel des retenues pour fournir les besoins.

On trouve ainsi 3 types de structures de programmation différents pour les quatre solutions :

1° - La structure la plus simple est relative à la solution IV sans dérivation. Pour cette solution, on a mis en oeuvre un programme simplifié PØH 616.

2° - La structure relative à la solution III est bâtie en tenant compte des dérivations, sachant que le barrage du CANUT étant construit le premier, la dérivation du HAUT-CANUT vers la CHEZE intervient toujours en second rang; le programme est plus complexe que le précédent, c'est le PØH 615.

3° - La structure relative aux solutions I et II est imposée par l'existence des dérivations et l'ordre d'appel des barrages mettant la CHEZE avant le CANUT, ce qui paraît obliger à simuler la dérivation des eaux du HAUT-CANUT vers la CHEZE avant de connaître le bilan simulé de la retenue du CANUT, vers lequel pourtant l'envoi des eaux du HAUT-CANUT est prioritaire. On doit donc procéder soit par itération entre les deux barrages pour répartir les eaux du HAUT-CANUT, soit par mise en mémoire du niveau du barrage du CANUT à la fin du mois M afin de constituer un test permettant de ne simuler la dérivation vers la CHEZE, pendant le mois M + 1, que si la retenue du CANUT est déjà pleine.

Avec cette seconde méthode, on ne peut éviter un certain gaspillage de l'eau du HAUT-CANUT qui, au cours d'un mois où la retenue du CANUT se remplit très vite jusqu'à son maximum de capacité, continuerait à aller vers cette retenue jusqu'à la fin du mois même si la retenue de la CHEZE n'était pas pleine.

L'autre méthode, avec itérations, est un peu lourde, mais les itérations étant évitées, grâce à quelques tests, chaque fois qu'elles sont inutiles, le temps de calcul n'est pas augmenté dans des proportions prohibitives et nous avons pu adopter cette méthode.

Ce programme est évidemment le plus complexe (PØH 614) et les deux autres ne sont que des adaptations de celui-ci par suppression de certaines instructions :

- relatives à la priorité du CANUT sur la CHEZE pour les eaux du HAUT-CANUT (PØH 615);
- et relatives en outre aux dérivations (PØH 616).

Ces différences sont cependant minimes, aussi présente-t-on un seul organigramme pour tous les programmes; les différences étant indiquées si nécessaires pour la compréhension.

3.3 Organigramme général des programmes

On donne, en annexe, le listing intégral du programme PØH 614, le plus complexe, suivi d'un exemple des sorties imprimées lors d'un passage d'essai.

On a représenté sur la figure II la logique externe de début des programmes contenant la lecture de toutes les données, la préparation de celles-ci en vue de la simulation. Puis, sur la figure III, se trouve décrit le schéma général de l'organigramme des programmes, tel qu'il fait suite au bloc d'instructions d'entrée décrit sur la figure II.

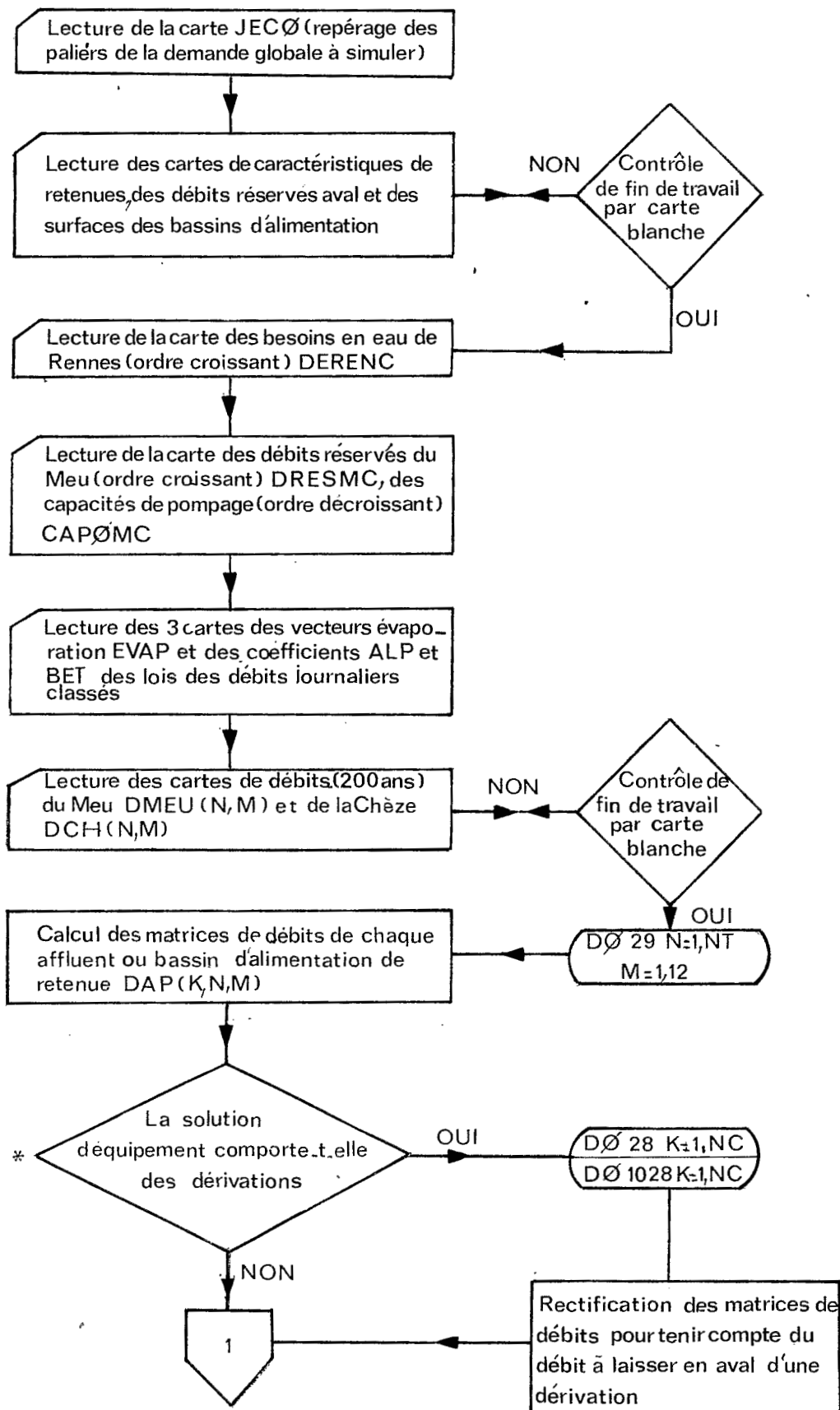
Le noyau central du programme constitué par les boucles DØ 900 et DØ 699 et qui effectue la simulation sur base mensuelle du fonctionnement durant 200 ans est décrit de manière plus détaillée dans le paragraphe suivant 3.4.

Les renseignements, donnés dans les chapitres précédents et surtout dans le chapitre 2 pour ce qui concerne les contraintes d'exploitation et la préparation des données, suffisent pour comprendre le contenu des divers blocs d'instructions d'entrée données dans la figure II.

Pour limiter le fonctionnement de la boucle centrale DØ 900 de simulation aux seuls stades et étapes intéressantes, on a mis en place tout un ensemble de tests limitants :

- a) A certains stades d'équipements, généralement les stades inférieurs de rang 1 et 2, il n'y a pas de refoulement, aussi est-il inutile d'explorer les 3 valeurs de la capacité de refoulement CAPØMC; le test TALIM permet de traverser la boucle correspondante DØ 920 en un seul passage.
- b) Quand, avec une capacité de refoulement donné CAPØMC, on a dépassé le seuil de défaillance défini plus haut, paragraphe 2.1 (NAD > 20), il est inutile de faire la simulation :
 - avec des valeurs inférieures à CAPØMC pour les étapes voisines (palier de demande globale et stade d'équipement identiques);
 - avec des valeurs inférieures ou égales à CAPØMC pour certaines des étapes considérées par la suite
 - soit sur un même palier de demande globale, mais avec un équipement moins complet,
 - soit sur les paliers de demande globale plus élevés, et avec le même équipement.

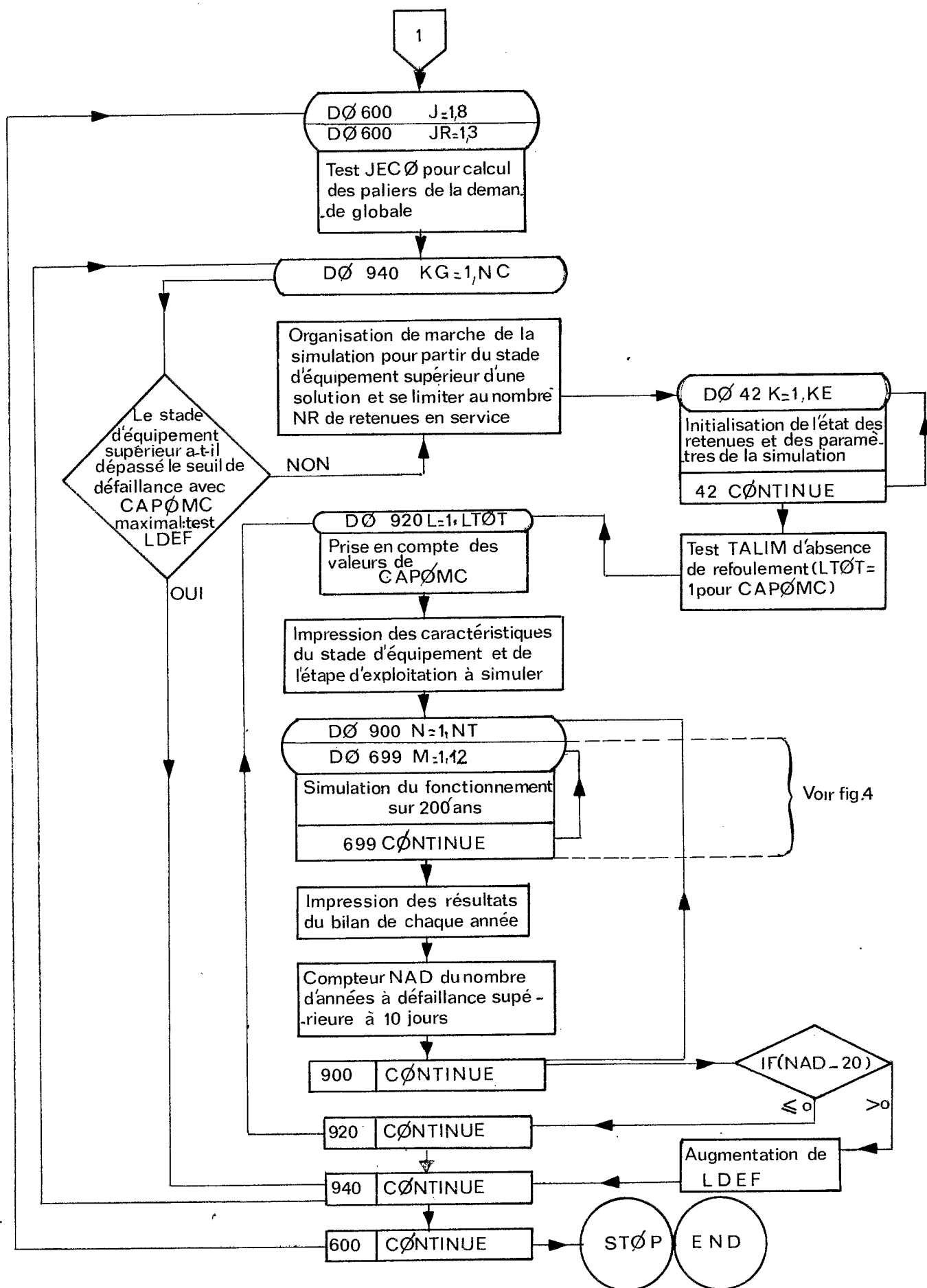
LOGIQUE EXTERNE DE LA LECTURE ET DE LA PRÉPARATION DES DONNÉES



* Groupe d'instructions n'existant pas dans PØH 616

ORGANIGRAMME GÉNÉRAL DES PROGRAMMES

Fig III



Voir fig.4

L'ensemble de ces limitations (b) est assuré par la sortie spéciale de boucle DØ 920 déclenchée par le test (NAD-20) et par la boucle DØ 941 "augmentation de LDEF". Evidemment, si la simulation est interdite par ces instructions pour toutes les valeurs de CAPØMC d'une série d'étapes d'exploitation donnée, cette série est sautée avant toutes les opérations préparant la boucle DØ 920 (test LDEF).

Exemple : Si le stade 3 de la solution II a été "défaillant" avec CAPØMC maximal face à la demande de 140 000 m³/j, il est inutile pour la demande de 160 000 m³/j de passer d'autres stades que ceux de rang 5 et 4. Par contre, si le stade 3 de la solution II n'avait été défaillant qu'avec la valeur 20 de CAPØMC, on aurait effectué 2 simulations pour le stade 3 face à la demande de 160 000 m³/j : d'abord avec la valeur 60 de CAPØMC, puis avec la valeur 40 de CAPØMC sauf si la simulation précédente avait fait apparaître une défaillance supérieure au seuil.

3.4 Organigramme du bloc central de programmation (voir figure IV)

Si l'on se place, dans l'ordre séquentiel du programme, au début de la boucle DØ 900, on voit que la simulation concernant une année donnée commence par l'initialisation à zéro de toutes les variables du bilan, puis qu'on aborde la boucle plus interne DØ 699 qui va être parcourue une fois pour chacun des 12 mois de l'année : à chacun de ces parcours, nous distinguons des opérations préliminaires (a) où l'on ne manipule encore aucun terme du bilan des retenues, des opérations (b) visant au calcul de ces termes quel que soit le programme PØH 614, 615, ou 616, des opérations (c) spéciales aux programmes PØH 614 et 615 ou au PØH 614 seul, enfin des opérations (d) communes aux trois programmes pour terminer le calcul du bilan.

a) Au cours d'un mois donné, on cherche d'abord à confronter les apports du MEU et la demande. L'instant T (repéré en jours à partir de 0 le 1er du mois à 0 heure) est celui auquel le débit du MEU, supposé décroissant suivant une loi exponentielle, atteint la valeur de la demande globale (besoins de RENNES et débit réservé du MEU). Le calcul de T conduit parfois à des valeurs négatives ou supérieures à 31, mais de toute façon le résultat est exploitable pour calculer une défaillance VØDEF qui serait théoriquement observée si l'on ne faisait pas appel aux retenues. De même, l'instant TR est celui auquel il devient impossible de refouler en utilisant les pompes à leur capacité maximale : entre les instants TR et T, le refoulement ne peut être effectué qu'avec un débit réduit, de plus en plus faible. Ici encore, ce que nous venons de dire ne concerne en toute rigueur qu'un des "cas de figure" possibles, mais de toute façon, on peut calculer un volume WØPR 1 susceptible d'être refoulé.

b) Après une nouvelle série d'instructions d'initialisation de variables, on entre dans la boucle DØ 510 qui, à l'intérieur des précédentes, permet de calculer successivement les éléments du bilan de chacune des retenues.

Fig-IV



Au volume retenu au début du mois, VD (KWR), on ajoute ou retranche les termes correspondant aux transferts, qui sont dans l'ordre de la programmation :

- les apports du bassin à l'amont de la retenue et éventuellement ceux qui ont été dérivés d'un autre bassin (voir l'instruction de calcul de VDA),
- le volume VØREF (KWR) refoulé à partir du MEU,
- le volume évaporé dans le mois (VØLEV),
- le volume destocké VØDES pour combler la défaillance VØPR 2 dans la mesure où la cote dans la retenue n'atteint pas la valeur minimale admise.

Cette série d'opérations conduit au volume retenu à la fin du mois VF (KWR), et l'on met en mémoire ce résultat par son affectation à la variable VD (KWR) pour la simulation du mois suivant.

c) En même temps que l'opération de prise en compte de VØREF (KWR) dans la retenue, on calcule éventuellement le volume VNDER (KRS), qu'il ne faut pas dériver sous peine de voir ce volume augmenter les débordements de la retenue. Cette variable est indicée KRS pour que le volume qu'elle représente puisse être pris en compte dans le bilan du bassin d'où part la dérivation. On calcule aussi en même temps le volume VØPR 1 encore disponible dans le MEU pour être refoulé vers les retenues suivantes.

Juste avant l'opération de calcul de VØDES, on cherche s'il y a lieu d'effectuer une deuxième (et dernière) approximation des calculs de bilan. Dans le cas où l'ordre d'appel de 2 retenues pour la fourniture diffère de l'ordre de priorité entre ces retenues pour l'affectation des débits d'un haut bassin (programme PØH 614), les opérations suivantes sont à effectuer au milieu du parcours de la boucle DØ 510 quand on a déjà déterminé en première approximation le bilan de la retenue non prioritaire et qu'on s'aperçoit que la retenue prioritaire ne sera pas pleine en fin de mois : le volume du "sous-remplissage" VSØUR, ou déficit de remplissage est alors éventuellement diminué en répartissant différemment entre les deux retenues le volume disponible à l'amont de la dérivation, d'où le nouveau calcul des termes VAPS (K) et VAPS (KP) de chacune de ces retenues et la sortie spéciale de boucle, GØ TØ 750, permettant de recommencer au début le parcours de la boucle DØ 510 (après avoir initialisé à nouveau convenablement les variables VØPR 2, VD, TD et VØPR 1).

d) Après le calcul de VF (KWR), vient celui de VAREM (KWR), variable dont la valeur sera imprimée dans les colonnes DEST, et qui correspond comme VØDES au volume destocké mais cette fois amputé du volume réservé pour le bief situé à l'aval de la retenue. Le volume VAREM (KWR) devra être acheminé théoriquement vers le MEU et éventuellement RENNES, pendant une fraction de la durée Ø entre l'instant T et la fin du mois (durée Ø pendant laquelle sévirait la défaillance VØDEF du MEU supposé seul fournisseur); cette fraction AJU (KWR) ou nombre de "jours utiles" de la retenue est calculée en supposant le débit de destockage constant et défini par le rapport de VØDEF à la durée résiduelle de la défaillance avant la prise en compte du volume VAREM (KWR) considéré. (Ainsi, les dernières retenues appelées doivent destocker à débit plus élevé, ce qui est en somme assez vraisemblable).

Les deux dernières opérations importantes avant 510 CØNTINUE sont le calcul du volume résiduel de défaillance (nouvelle valeur prise par VØPR 2), compte tenu du volume VAREM (KWR), et le volume écoulé à l'aval de la retenue, VAV (KWR).

Après la boucle DØ 510, la simulation des transferts au cours du mois n'est pas terminée, car il faut déduire du bilan des retenues certains termes du bilan du MEU, qui lui-même peut présenter une défaillance par rapport à son débit réservé, d'où le calcul :

- de VAVM, volume écoulé à l'aval de MORDELLIES (augmenté éventuellement du volume écoulé à l'aval de la retenue du CANUT),
- de VØPR 2, évaluation définitive du volume de défaillance, ou défaillance résiduelle,
- du nombre de jours de défaillance AJD, calculé à partir de la durée θ définie plus haut, multipliée par le rapport de la défaillance résiduelle à VØDEF.

Enfin, on trouve avant 699 CØNTINUE les instructions par lesquelles les termes cumulatifs du bilan mensuel sont ajoutés à ceux des mois précédents de la même année.

3.5 Explications complémentaires sur les variantes du traitement automatique d'une solution d'équipement à l'autre

Le procédé utilisé pour que les données d'entrée, les termes de bilan et les résultats à imprimer soient indicés correctement en fonction de la retenue à laquelle ils se rapportent, fait appel à 5 paramètres figurant dans chacune des cartes CDT de données topographiques lues dans le format n° 1, cartes qui sont au nombre de NC, nombre de stades d'équipement. Nous allons voir, en indiquant les valeurs de ces paramètres pour 3 des solutions étudiées, quelles sont les règles adoptées pour choisir ces valeurs :

a) Pour la solution IV et ses stades n° 1 à 4, les cartes CDT contiennent :

: Stade	: Données topographiques:	ALIM(K)	: KW(K)	: KV(K)	: KZ 1(K)	: KZ 2(K)	:
: n° 1 (K = 1) :	CHEZE	: 0	: 1	: 1	: 0	: 0	:
: n° 2 (K = 2) :	CHEZE	: 1	: 0	: 0	: 0	: 0	:
: n° 3 (K = 3) :	ROHUET	: 1	: 2	: 0	: 0	: 0	:
: n° 4 (K = 4) :	CANUT	: 0	: 3	: 0	: 0	: 0	:

Cette solution pourrait être étudiée avec les données ci-dessus à l'aide d'un programme plus général, PØH 614 ou PØH 615, mais les tests qui dans ces programmes utilisent les valeurs des paramètres KZ 1(K) et KZ 2(K) seraient évidemment inutiles, et il est plus économique de se servir d'un programme simplifié, le PØH 616.

Le paramètre ALIM(K) est égal à 1 ou 0 suivant qu'il y a ou non un équipement de refoulement vers la retenue indiquée sur la même carte CDT au stade représenté par cette carte.

Le paramètre KW(K) est le numéro d'appel de la retenue pour le destockage.

Le paramètre KV(K) est égal à 0 en général, ou à 1 si la retenue, soumise au stade de rang K à un régime de remplissage naturel, est soumise à un stade K' ultérieur à un régime mixte avec les mêmes apports naturels augmentés de volumes refoulés à partir du MEU (en pareil cas ALIM(K) est nul, ALIM(K') est égal à 1 et les 4 derniers paramètres du stade de rang K' sont nuls).

b) Pour la solution III et ses stades n° 1 à 4, les cartes CDT contiennent :

: Stade	: Données topographiques:	: ALIM(K):	: KW(K):	: KV(K):	: KZ 1(K):	: KZ 2(K):
: n° 1 (K = 1) :	CANUT	: 0	: 1	: 0	: 0	: 3
: n° 2 (K = 2) :	CHEZE	: 0	: 2	: 0	: 0	: 0
: n° 3 (K = 3) :	CHEZE	: 1	: 2	: 0	: 1	: 0
: n° 4 (K = 4) :	ROHUET	: 1	: 3	: 0	: 0	: 0

La seule différence avec la solution IV appelant ici des commentaires apparaît dans les valeurs choisies pour les deux derniers paramètres:

KZ 2 (1) est égal à 3 car 3 est le rang du stade auquel on considère la retenue voisine équipée pour recevoir des débits dérivés à partir du bassin de rang 1;

KZ 1 (3) est égal à 1, symétriquement, pour indiquer qu'au stade 3 la retenue considérée reçoit ces débits dérivés.

c) Pour la solution I et ses stades n° 1 à 5, les cartes CDT contiennent :

: Stade	: Données topographiques:	: ALIM(K):	: KW(K):	: KV(K):	: KZ 1(K):	: KZ 2(K):
: n° 1	CHEZE	: 0	: 1	: 0	: 0	: 0
: n° 2	CHEZE	: 0	: 1	: 1	: 4	: 0
: n° 3	CHEZE	: 1	: 0	: 0	: 0	: 0
: n° 4	CANUT	: 0	: 2	: 0	: 0	: 2
: n° 5	ROHUET	: 1	: 3	: 0	: 0	: 0

Par rapport au cas de la solution III, on voit qu'ici les rôles des paramètres KZ 1(K) et KZ 2(K) sont inversés. Cela permettrait, si besoin était, d'éviter l'erreur d'utiliser le programme PØH 614 pour une simulation du type de la solution III ou le PØH 615 pour une simulation du type des solutions I et II.

En effet, on pourra noter que conventionnellement, la répartition des rôles de KZ 1(K) et KZ 2(K) est liée au fait qu'il y a ou non concordance entre l'ordre d'appel de deux retenues particulières pour le destockage et l'ordre de priorité entre ces deux retenues pour l'affectation des débits d'un haut bassin.

Il est utile de noter aussi, pour différencier ces deux cas et ces deux programmes, que :

- pour la solution III, CØEF (1) = 2,64
- pour la solution I, CØEF (4) = 1,75

Cela signifie que les apports pris en compte pour la retenue du CANUT sont, à l'origine du calcul, ceux du bassin total de cette rivière (à l'amont de la retenue) dans le cas de la solution III, ceux du bassin intermédiaire entre la dérivation et la retenue dans le cas de la solution I; pour chacune des solutions III (stade 3) et I (stade 2) les valeurs de CØEF et QØEF relatives à la CHEZE sont les mêmes, respectivement 1,89 (qui correspond à la somme des bassins de la CHEZE et du HAUT-CANUT) et 0,89 (qui correspond au HAUT-CANUT).

3.6 Commentaire des résultats de la simulation (voir tableau n° 4)

Les résultats totalisés à l'échelle annuelle ne permettant pas de contrôler dans le détail le respect des équations du bilan, nous donnons ci-dessous quelques exemples de résultats obtenus à l'échelle mensuelle au cours de passages d'essai à l'ordinateur (chiffres en milliers de m³).

a) Solution III, besoins de RENNES 27 500 m³/j, débit réservé du MEU 10 000 m³/j, stade d'équipement n° 4, capacité de refoulement 60 000 m³/j, mois de Mai;

b) mêmes éléments que l'exemple (a), mais mois de Septembre;

c) solution III, besoins de RENNES 178 000 m³/j, débit réservé du MEU 50 000 m³/j, stade d'équipement n° 4, capacité de refoulement 20 000 m³/j, mois de Juin;

d) mêmes éléments que l'exemple (c), sauf le stade d'équipement qui est le n° 3, et le mois qui est Septembre.

On peut voir que dans l'exemple (a), les besoins de RENNES sont fournis en totalité par le MEU et chacun des débits réservés peut être maintenu, ce qui justifie le résultat "défaillance nulle". Le volume disponible sur les apports du HAUT-CANUT est dérivé vers la CHEZE, ce qui est normal puisque la retenue du CANUT est pleine en fin de mois. On peut

Vérifier aisément que le bilan de chaque retenue est exact et que le résultat apparu à la ligne AVAL correspond aux apports du MEU diminués de la fourniture de RENNES et augmentés des 3 termes AV eux-mêmes diminués respectivement des volumes réservés correspondants, puisque ces derniers (93, 31 et 8) sont supposés consommés le long des biefs.

Dans l'exemple (b), les besoins de RENNES (825) sont fournis par destockage de la retenue de la CHEZE, ce destockage fournissant en plus 39 pour le soutien du débit du MEU. Cette différence mise à part, l'exemple (b) se prête aux mêmes vérifications que le précédent. Les défaillances des bassins du HAUT-CANUT et du SEREIN sont respectivement 58 et 20 mais elles ne sont pas comptabilisées puisque les débits réservés sont simplement à "laisser".

Dans l'exemple (c), les apports du MEU sont supérieurs aux besoins de RENNES (5 340), mais inférieurs à la somme de ces besoins et du volume réservé du MEU (1 500). A l'échelle journalière, compte tenu de la loi de répartition exponentielle admise au sein du mois, il y a encore des jours où la demande globale peut être fournie largement par le MEU, laissant un volume disponible pour le refoulement vers les retenues; mais il y a des jours où ces retenues doivent être appelées pour éviter une défaillance de la fourniture de RENNES. On peut vérifier que la défaillance totale est nulle en ajoutant les volumes fournis par le MEU et par le CANUT et en constatant d'autre part que les débits réservés peuvent tous être maintenus. D'autres vérifications peuvent être faites comme dans l'exemple (a) en remarquant que les bilans des retenues doivent être calculés en affectant les apports du HAUT-CANUT à la retenue du CANUT.

Dans l'exemple (d), les apports du MEU sont tellement inférieurs à la demande globale qu'il n'y a pas un seul jour du mois où le MEU peut contribuer à la fourniture de RENNES. A plus forte raison, tout refoulement est impossible vers la retenue de la CHEZE. Cette dernière seule peut fournir, moyennant une baisse de niveau jusqu'à la cote minimale, un certain volume à RENNES; la retenue du CANUT, elle, est déjà à sa cote minimale. Le destockage de la CHEZE est réparti entre RENNES (2 848) et le MEU, dont les apports ont besoin de 1 065 pour atteindre le volume réservé. Le bilan de chacune des retenues peut être vérifié comme dans les autres exemples, et le volume total des défaillances comptabilisées comprend celui qui manque (2 492) pour satisfaire les besoins de RENNES (5 340), et celui qui manque (19) pour maintenir le débit réservé du CANUT (débit qui correspond au volume 90).

Remarques

a) On pourra noter que même à l'échelle annuelle, il apparaît parfois une défaillance dès l'année n° 1 bien que l'hydraulicité de cette année soit forte. Il s'agit d'une satisfaction incomplète des débits réservés à l'aval des retenues, tant que la cote n'a pas atteint son niveau minimal. De plus, le mécanisme des programmes est conçu de telle sorte que, si l'on dispose d'une retenue où le destockage est permis, ce transfert intervient alors pour réduire ou annuler la défaillance. Nous n'avons pas jugé nécessaire de modifier ce mécanisme pour la période très courte de remplissage initial.

TABLEAU n° 4

EXEMPLES de FONCTIONNEMENT SIMULE des EQUIPEMENTS
à l'ECHELLE MENSUELLE

	Exemple (a)	Exemple (b)	Exemple (c)	Exemple (d)
- Apports du MEU	5 394	261	5 745	435
Fourniture de RENNES par le MEU	852	0	3 555	0
- Apports du CANUT non compris le HAUT-CANUT (bassin n° 1)	448	4	210	105
DEST 1 (*)	0	864	1 785	0
AV 1 (*)	231	90	90	71
Volume retenu initial	19 050	17 365	18 957	2 900
Volume retenu final	19 047	16 275	17 064	2 900
Volume évaporé	220	140	275	34
- Apports de la CHEZE (bassin n° 2)	256	2	120	60
REF 2 (*)	0	0	103	0
DEST 2 (*)	0	0	0	3 913
AV 2 (*)	269	30	30	30
Volume retenu initial	14 720	14 506	14 719	6 253
Volume retenu final	14 719	14 375	14 720	2 330
Volume évaporé	154	103	192	40
- Apports du HAUT-CANUT	228	2	107	53
Volume laissé dans le HAUT-CANUT	62	2	60	53
Volume disponible en plus du volume laissé au HAUT-CANUT	166	0	47	0
- Apports du ROHUET (bassin n° 3)	49	0	23	x
REF 3 (*)	0	0	46	x
DEST 3 (*)	0	0	0	x
AV 3 (*)	92	7	8	x
Volume retenu initial	9 883	9 728	9 882	x
Volume retenu final	9 882	9 659	9 883	x
Volume évaporé	92	62	112	x
- Apports du SEREIN	156	1	73	x
Volume laissé dans le SEREIN	22	1	21	x
Volume disponible en plus du volume laissé au SEREIN	134	0	52	x
AVAL (*)	5 001	300	2 040	1 500
REF (*)	0	0	0	2 511

(*) : symboles utilisés pour les titres des colonnes de sortie sur imprimante
(voir leur signification dans le paragraphe 3.1) -

Le fonctionnement des équipements au cours de l'année n° 1 et même de l'année n° 2 peut être supposé sans défaillance malgré les résultats de la simulation, et l'on peut être assuré qu'il ne se présente pas par ailleurs d'autres infidélités du mécanisme de programmation par rapport à une simulation hydrauliquement correcte : en effet, si le phénomène se reproduit au cours d'années sèches, et s'il est alors indécélable puisqu'il y aura de toute façon une défaillance, son importance quantitative est très limitée et les résultats fournis dans les colonnes DEF et DEST peuvent même être rigoureusement exacts dès qu'on admet la possibilité de prévenir le phénomène, grâce à un programme de gestion approprié; autrement dit, l'imprécision éventuelle du mécanisme de programmation reste très inférieure à la différence inévitable entre des simulations utilisant ou non la prévision des apports.

b) Pour compléter les explications données dans la remarque précédente (a), on peut signaler le fait suivant : le calcul du nombre de jours de défaillance étant effectué seulement s'il existe une défaillance "initiale", c'est-à-dire si le MEU à lui seul est incapable de satisfaire la demande globale, on comprendra pourquoi les défaillances éventuelles de première année se présentent avec une durée nulle.

c) A l'examen des sorties imprimées que nous fournissons pour certaines solutions d'équipement, et du listing annexé au présent rapport, on pourrait s'étonner de ne pas trouver exactement la confirmation de ce qui est écrit plus haut (paragraphe 3.3) concernant la limitation du nombre de combinaisons traitées.

En effet les tests limitants prévus n'ont été utilisés sans modifications que pour le premier calcul automatique effectué, celui de la solution IV. Pour le second calcul, celui de la solution III, nous pouvions prévoir d'après les résultats du premier qu'un certain nombre de combinaisons "demande globale - équipement" ne feraient apparaître aucune défaillance pendant les 200 années de l'échantillon fictif. Un test supplémentaire a été intégré dans le programme PØH 615 pour éviter d'effectuer la simulation suivant les combinaisons rencontrées de valeurs des compteurs JJ et KG. Pour les deux derniers calculs, ceux des solutions I et II, ce test a été complété par un autre tenant compte également de la valeur du compteur L, et les seuils numériques adoptés pour le test décrit dans le paragraphe 3.3 ont été remplacés par les suivants : 8 années au cours desquelles il apparaît plus de 30 jours de défaillance. Des combinaisons qui auraient donné lieu à une simulation sans cette dernière modification ont pu être éliminées de la sorte, et c'était le but recherché car elles ne pouvaient dans la pratique être acceptables, la sévérité de certaines de leurs défaillances annuelles devenant plus gênante que la fréquence d'apparition des années à défaillances moyennes.

CONCLUSION

Il ne nous appartient pas de faire une interprétation des résultats obtenus pour comparer les quatre solutions d'équipement.

Les sorties fournies par l'imprimante (quatre séries d'environ 50 simulations sur 200 années chacune, pour les quatre "solutions d'équipement") ayant été remises à la SER, nous présentons seulement ci-joint deux tableaux récapitulatifs (tableaux n° 5 et 6). Ces tableaux indiquent, pour chaque combinaison C d'une étape d'exploitation et d'une valeur de la demande globale, la fréquence F (exprimée en pourcentage) des années où la défaillance dure plus de 30 jours. Il apparaît ainsi, chaque fois que cette fréquence F est nulle, la preuve qu'on est en présence d'une étape inutilement coûteuse (en équipement et en énergie de refoulement), sauf si cette étape est suivie d'une étape où F n'est pas nulle quand on passe, sur la même ligne, à l'étape immédiatement voisine dans l'ordre du coût décroissant : cette dernière remarque permet de mettre en relief (chiffres cerclés dans nos tableaux) les combinaisons C dont la suite doit ponctuer théoriquement le calendrier de la mise en exploitation dans le cadre de la "solution" considérée, si l'on désire une sécurité absolue. La prise en compte des facteurs économiques et d'un seuil de sévérité des défaillances conduira sans doute à adopter un calendrier légèrement retardé, mais ceci en restant dans une gamme de variation acceptable, la limite pouvant être représentée par la suite des combinaisons C indiquées par des chiffres encadrés. Au-delà de ces dernières combinaisons, dans le sens d'une réduction des coûts, on trouve des combinaisons où les défaillances dépassent le seuil de sévérité de 4 % admis, et d'ailleurs les tests limitateurs du traitement automatique ont joué de telle sorte qu'il n'y a jamais plus d'une combinaison C trop défaillante et cependant testée par simulation, dans une série de combinaisons à coûts décroissants : les cases suivantes dans de telles séries sur nos tableaux sont marquées par des croix x.

Deux commentaires sont encore nécessaires pour présenter les tableaux n° 5 et 6 :

a) les cases laissées en blanc, où il est évident que la fréquence serait soit nulle, soit supérieure à 4 %, correspondent à des combinaisons pour lesquelles la simulation n'a pas été effectuée, grâce à l'un des tests limitateurs cités dans la dernière remarque du paragraphe 3.6, parce que l'un des passages précédents à l'ordinateur avait permis de prévoir le type de résultat "combinaison inutilement coûteuse" ou bien "à trop fortes défaillances";

b) les cases où les chiffres sont entre parenthèses sont celles des combinaisons pour lesquelles la simulation n'a pas été effectuée non plus, parce que les résultats numériques sont évidemment les mêmes que certains déjà obtenus lors du traitement d'une autre solution d'équipement.

L'ensemble des résultats montre que la satisfaction des niveaux supérieurs de la demande est impossible sans passer à un équipement plus important. Le nombre et les caractéristiques des retenues étant conservés, on peut essayer d'augmenter la capacité de pompage et de faire quelques simulations pour les combinaisons marginales telles que, par

TABLEAU n° 5

RECAPITULATION des RESULTATS de SIMULATION sur 200 ANNEES de DEBITS FICTIFS

FREQUENCE % des ANNEES PRESENTANT plus de 30 JOURS de DEFAILLANCE

Solution d'équipement n° 1

n° des stades d'équipement		5			4			3			2	1
Capacité de refou- lement (*)		60	40	20	60	40	20	60	40	20	x	x
Valeurs de la demande globale PENNES + MEU (*)	27,5 + 10							(0)	(0)	(0)	(0)	(0)
	27,5 + 30				0	0	0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5
	41 + 30			0	0	0	0	0,5	0,5	0,5	2	3,5
	55 + 30	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	1	3,5	8
	82,5 + 30	0	0	0	0,5	0,5	0,5	4	5	x	12	x
	110 + 30	0,5	0,5	2,5	1,5	2,5	3,5	17	x	x	x	x
	110 + 50	2,5	2,5	4	4	6	x	x	x	x	x	x
	151 + 30	5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Solution d'équipement n° 2

n° des stades d'équipement		6			5			4			3			2	1
Capacité de refou- lement (*)		60	40	20	60	40	20	60	40	20	60	40	20	x	x
Valeurs de la demande globale PENNES + MEU (*)	27,5 + 10										0	0	0	0	(0)
	27,5 + 30				0	0	0	0	0	0	(0,5)	(0,5)	(0,5)	(0,5)	(1,5)
	41 + 30			0	0	0	0	0	0	0	(0,5)	(0,5)	(0,5)	(2)	(3,5)
	55 + 30	0	0	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	(0,5)	(0,5)	(1)	(3,5)	(8)
	82,5 + 30	0	0	0	1	1	2,5	1	1	2,5	(4)	(5)		(12)	
	110 + 30	0,5	1	2,5	4	5	x	4	x	x					
	110 + 50	2,5	2,5	4	6,5	x	x	x	x	x					
	151 + 30	5	x	x	x	x	x	x	x	x					

(*) débits exprimés en milliers de m³/j

TABLEAU n° 6

RECAPITULATION des RESULTATS de SIMULATION sur 200 ANNEES de DEBITS FICTIFS

FREQUENCE % des ANNEES PRESENTANT plus de 30 JOURS DE DEFAILLANCE

Solution d'équipement n° 3

n° des stades d'équipement		4			3			2			1		
Capacité de refou- lement (*)		60	40	20	60	40	20	x	x	x	x	x	x
Valeurs de la demande globale RENNES + MEU (*)	27,5 + 10							0	0				
	27,5 + 30				0	0	0	0	0				
	41 + 30	0	0	0	0	0	0	0	0		0,5		
	55 + 30	0	0	0	0	0	0	0	0		2,5		
	82,5 + 30	0	0	0	0,5	0,5	1	2	7				
	110 + 30	1	1,5	2,5	2,5	3,5	4	6	25				
	110 + 50	3,5	3,5	5	6	7	7	7,5	x				
	151 + 30	5,5	6,5	6,5	9	x	x	x	x				
	178 + 30	9	x	x	x	x	x	x	x				

Solution d'équipement n° 4

n° des stades d'équipement		4			3			2			1		
Capacité de refou- lement (*)		60	40	20	60	40	20	60	40	20	x	x	x
Valeurs de la demande globale RENNES + MEU (*)	27,5 + 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	27,5 + 30	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0,5	1,5		
	41 + 30	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0,5	3,5		
	55 + 30	0	0	0	0,5	0,5	1,5	0,5	0,5	2,5	8		
	82,5 + 30	0	0	0	1,5	2,5	5	5	6,5	x	23		
	110 + 30	1	2,5	3	6,5	8,5	13	18	x	x	x		
	110 + 50	3	4	6	11	x	x	x	x	x	x		
	151 + 30	6	7,5	9,5	x	x	x	x	x	x	x		
	178 + 30	9,5	x	x	x	x	x	x	x	x	x		

(*) débits exprimés en milliers de m³/j

Nota : chiffres soulignés obtenus parce que le test limitateur était (20 ans, 10 j)

exemple dans le cadre de la solution n° 1, stade n° 3 en face de la demande 110 + 30, stades n° 3 et 4 en face de la demande 110 + 50, stade n° 5 en face de la demande 151 + 30, etc... Si l'on veut seulement, vers la fin de la vie des équipements, obtenir une prolongation assez importante jusqu'à des paliers de demande tels que 178 + 30, etc..., il suffira bien sûr de faire ces essais en se plaçant au stade d'équipement le plus complet. L'intérêt de l'augmentation de la capacité de pompage CAPØM est évident si l'on considère l'exemple de sorties fourni en annexe. De plus, on peut parfois prévoir grosso modo la modification quantitative du bilan pour un aa qui résulterait d'une augmentation de CAPØM, par exemple, dans des cas simples où la défaillance est à peine supérieure à 30 jours et où le volume refoulé est assez grand pour qu'on puisse supposer qu'il l'a été souvent en utilisant CAPØM en totalité.

Nous nous permettons enfin de rappeler que l'information hydrologique disponible pour notre étude était très limitée, et il faut donc être assez prudent pour exploiter nos résultats. Ils permettent sans doute d'établir un classement préférentiel entre les solutions d'équipement, en fonction de l'ensemble des données économiques que l'on adoptera. Mais ce classement lui-même doit reposer sur des différences assez sensibles de coût pour pouvoir être adopté sans hésitations, et de toute façon, en valeur absolue, les coûts qui pourront être calculés devront être assortis d'un intervalle de confiance assez large.

Nous avons cependant cherché à traiter le problème de la simulation avec autant de finesse que nous le pouvions, notamment par l'introduction des lois de répartition des débits journaliers du MEU au sein de chaque mois. Ainsi nous n'avons pas délibérément aggravé l'imprécision des résultats et les programmes mis au point pourront éventuellement être utilisés à nouveau avec des données hydrologiques plus sûres.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] C.G.E. - RENNES - 1970 - "Bassin du MEU. Etude des ressources du bassin. Rapport n° 2" - DDA ILLE et VILAINE, RENNES -
- [2] SETET, SER - 1970 - "Aménagement intégré du bassin du MEU. Note hydrologique complémentaire" - DDA ILLE et VILAINE, RENNES -
- [3] Y. BRUNET-MORET - 1969 - "Etude de quelques lois statistiques utilisées en hydrologie" - Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie, Vol. VI, n° 3 -

A N N E X E

LISTING du PROGRAMME PØH 614
et EXEMPLES de SORTIES IMPRIMEES

```

C     SIMULATION DU FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE DU PROJET DU MEU (3 RETENUES)
C  ** CAS DE 6 STADES D'EQUIPEMENT DONT CERTAINS SANS REFOULEMENT VERS UNE OU
C     PLUSIEURS RETENUES ULTERIEUREMENT ALIMENTEES PAR REFOULEMENT
C  ** POSSIBILITE D'ALIMENTATION DE CERTAINES RETENUES PAR TRANSFERT D'UN BASSIN
C     VERS L'AUTRE A CERTAINS STADES D'EQUIPEMENT
C  ** CAS OU UN BASSIN BENEFICIAIRE D'UN TRANSFERT (DE LA PART D'UN AUTRE BASSIN,
C     SOIT B', QUAND LE BILAN DE CE DERNIER LE PERMET) EST SOLLICITE AVANT B' POUR
C     LA FOURNITURE
      DIMENSION VMAX(7),VMIN(7),SMAX(7),A(7),B(7),C(7),D(7),DRES(7),DERE
      INC(8),DRESMC(3),CAPOMC(3),EVAP(12),DMEU(201,12),DCH(200,12),AJ(12)
      2,VD(7),VF(7),VOREF(7),VAV(7),VAREM(7),ALIM(7),COEF(7),DRESS(7),QOE
      3F(7),VAPS(7),KV(7),AJU(7),ALP(12),BET(12),VREF(7),VREM(7),DU(7),VV
      4(7),DEFS(6,200,12),DAP(6,200,12),KU(7),KW(7),VDESUP(7),VDSUP(7),KZ
      51(7),KZ2(7),VNDER(7),JECO(24),WD(7),LDEF(7)
      READ(5,6){JECO(J),J=1,24}
      6 FORMAT(24I2)
      K=1
      10 READ(5,1)VMAX(K),VMIN(K),SMAX(K),A(K),B(K),C(K),D(K),DRES(K),ALIM(
      1K),COEF(K),DRESS(K),QOEF(K),KW(K),KV(K),KZ1(K),KZ2(K)
      1 FORMAT(3F6.0,4F9.6,F4.2,F2.0,F6.4,F4.2,F6.4,4I1)
      IF(VMAX(K))12,11,12
      12 K=K+1
      GO TO 10
      11 NC=K-1
      READ(5,2){DERENC(J),J=1,8}
      2 FORMAT(8F4.1)
      READ(5,5){DRESMC(JR),JR=1,3},{CAPOMC(L),L=1,3}
      5 FORMAT(6F3.0)
      READ(5,3){EVAP(M),M=1,12}
      READ(5,3){ALP(M),M=1,12}
      READ(5,3){BET(M),M=1,12}
      3 FORMAT(12F5.3)
      N=1
      20 READ(5,4){DMEU(N,M),M=1,12}
      4 FORMAT(12F6.2)
      IF(DMEU(N,1))21,21,22
      22 READ(5,4){DCH(N,M),M=1,12}
      N=N+1
      GO TO 20
      21 NT=N-1
      DO 29 K=1,NC
      IF(COEF(K))23,29,23
      23 CF=CCEF(K)
      DO 29 N=1,NT
      DO 29 M=1,12
      DAP(K,N,M)=CF*DCH(N,M)
      29 CONTINUE
      DO 23 K=1,NC
      IF(DRESS(K))28,28,27
      27 QF=QOEF(K)/CCEF(K)
      DO 26 N=1,NT
      DO 26 M=1,12
      DAPP=DAP(K,N,M)
      DEFS(K,N,M)=AMAX1(0.,DRESS(K)-DAPP*QF)
      26 DAP(K,N,M)=DAPP-DRESS(K)+DEFS(K,N,M)
      28 CONTINUE
      DO 1028 K=1,NC

```



```

      IF(DRESS(K))1027,1027,1028
1027 DO 1026 N=1,NT
      DO 1026 M=1,12
1026 DEFS(K,N,M)=0.
1028 CONTINUE
      DC 50 M=1,12
      GO TO(31,30,31,30,31,30,31,31,30,31,30,31),M
    31 AJ(M)=31.
      GC TC 50
    30 AJ(M)=30.
    50 CONTINUE
      AJ(2)=AJ(2)-1.75
      DO 55 KG=1,7
    55 LDEF(KG)=0
      DO 600 J=1,8
      DEREN=DERENC(J)
      DO 600 JR=1,3
      JJ=3*J+JR-3
      IF(JECC(JJ))600,600,1002
1002 DRESM=DRESMC(JR)
      DO 940 KG=1,NC
      IF(LDEF(KG).EQ.3)GO TO 940
      IF((JJ*KG).EQ.2.)GO TO 940
      KE=NC-KG+1
      NR=0
      CREST=0.
      TALIM=0.
      DO 42 K=1,KE
      NR=MAX0(NR,KW(K))
      TALIM=TALIM+ALIM(K)
      VOREF(K)=0.
      VAREM(K)=0.
      VAV(K)=0.
      VF(K)=0.
      KU(K)=1
      KWT=KW(K+1)
      IF(K+1.GT.KE)KWT=KW(K)+1
      IF(KW(K).EQ.KWT.OR.KW(K).EQ.0)KU(K)=0
      DREST=DREST+DRES(K)*FLOAT(KU(K))
    42 CONTINUE
      IF(TALIM.EQ.0.)LDEF(KG)=2
      LTOT=3-LDEF(KG)
      DO 920 L=1,LTOT
      IF((JJ*KG).EQ.5.AND.L.LE.2)GO TO 920
      CAPOM=CAPOMC(L)
      WRITE(6,400)DEREN,DRESM,NR,KE,CAPOM
4000 FORMAT('1BESCINS EN MILLIERS DE M3/J :',F5.1,' POUR RENNES +',F4.0
1,' POUR LE MEU ;',I2,'RETENUES (STADE',I2,'); CAP.REFOULEMENT :',F4
2.0,'MILLIERS DE M3/J')
      DO 401 K=1,KE
    401 VD(K)=0.
      NPREC=-1
      NAD=0
      DO 900 N=1,NT
      IF((N-1)/50-NPREC)420,420,430
    430 IF(NPREC)435,436,436
    436 WRITE(6,5200)
5200 FORMAT('1')

```

```

435 WRITE(6,5000)
5000 FORMAT(/2X,'N MODULE  AVAL      DEF (EN,J)      REF1.DEST1.(EN,J)  AV
      11.DAD.      REF2.DEST2.(EN,J)  AV2.DAC.      REF3.DEST3.(EN,J)  AV3.
      2DAD.'//)
420 NPREC=(N-1)/50
      VTM=0.
      VM=0.
      VDF=0.
      CDF=0.
      DO 450 K=1,KE
      VREF(K)=0.
      VREM(K)=0.
      CU(K)=0.
      VDSUP(K)=0.
450  VV(K)=0.
      DO 659 M=1,12
      ALPHA=ALP(M)
      BETA=BET(M)
      Q=DMFU(N,M)
      DEMAV=DEREN+DRESM
      T=ALOG(BETA*Q/DEMAV)/ALPHA
      IF(T)650,650,655
650  VOPR2=-AJ(M)*(Q-DEMAV)
      GO TO 670
655  IF(AJ(M)-T)660,660,665
660  VOPR2=0.
      GO TO 67C
665  VOPR2=(AJ(M)-T)*DEMAV+Q*BETA/ALPHA*(EXP(-ALPHA*AJ(M))-EXP(-ALPHA*T
      1))
670  QS=DEMAV+CAPCM
      TR=ALOG(BETA*Q/QS)/ALPHA
      IF(TR)680,680,685
680  WOPR1=BETA*Q/ALPHA-DEMAV*(T+1./ALPHA)
      IF(T.LE.0.)WOPR1=0.
      GO TO 700
685  IF(AJ(M)-TR)690,690,695
690  WOPR1=AJ(M)*CAPCM
      GO TO 700
695  TF=AMIN1(AJ(M),T)
      WOPR1=TR*CAPCM-Q*BETA/ALPHA*(EXP(-ALPHA*TF)-EXP(-ALPHA*TR))-(TF-TR
      1)*DEMAV
700  VODEF=VOPR2
      LARIT=1
      DO 509 K=1,KE
      VNDER(K)=0.
509  VAPS(K)=0.
      VOREFT=0.
      VAVRET=0.
750  TD=T
      VCPRI=WOPR1
      DO 510 K=1,KE
      VNDEV=0.
      IF(KU(K))510,510,48
48  KWR=KW(K)
      R=0.
      IF(KV(K).GT.0.AND.K.LT.KF)R=1.
      TD=AMAX1(0.,AMIN1(AJ(M),TD))
      RALIM=ALIM(K)+R

```

```

VRES=AJ(M)*DRES(K)
KP=KZ2(K)
IF(KP.NE.0)VAPS(K)=VAPS(K)+VNDER(K)-AJ(M)*DEFS(KP,N,M)
WD(KWR)=VD(KWR)
VDA=VD(KWR)+AMAX1(0.,AJ(M)*DAP(K,N,M)+VAPS(K))
VFA=VDA+VOPR1*RALIM
SFA=AMIN1(SMAX(K),AMAX1(A(K)*VFA**B(K),C(K)*VFA**D(K)))
VOLEV=AMIN1(VFA,EVAP(M)*SFA)
VFA=VFA-VOLEV
VOREF(KWR)=AMAX1(0.,VCPRI*RALIM-AMAX1(0.,VFA-VMAX(K)))
IF(VOREF(KWR).GT.0..OR.KZ1(K).EQ.0..OR.KZ1(K).GT.KE)GO TO 515
VODEV=AMAX1(0.,VFA-VMAX(K)-VOPR1*RALIM)
KRS=KZ1(K)
VNDEV=AMIN1(VODEV,AMAX1(0.,QDEF(K)*DCH(N,M)-DRESS(K))*AJ(M))
VNDER(KRS)=VNDEV
515 VCPRI=VCPRI-VCREF(KWR)
VFA=AMIN1(VMAX(K),VFA-VOPR1*RALIM)
VSOUR=VMAX(K)-VFA
IF(VSOUR*KP*LARIT)514,514,511
511 LARIT=0
VODERB=(QDEF(KP)*DCH(N,M)-DRESS(KP))*AJ(M)
IF(VODERB)514,514,513
513 VODER=VODERB-VNDER(K)
VAPS(KP)=-AMIN1(VSOUR,VODER)
VCPR2=VCDEF
VAPS(K)=-VAPS(KP)
DO 740 KANT=1,KWR
740 VD(KANT)=WD(KANT)
GO TO 750
514 VODES=AMAX1(0.,AMIN1(VFA-VMIN(K),VOPR2+VRES))
VF(KWR)=VFA-VODES
VD(KWR)=VF(KWR)
VAREM(KWR)=AMAX1(0.,VODES-VRES)
IF(VODEF)518,518,519
518 AJU(KWR)=0.
GO TO 516
519 AJU(KWR)=(AJ(M)-TD)*VAREM(KWR)/VODEF
TD=TD+AJU(KWR)
516 VOPR2=VOPR2-VODES+VRES
VDFSUP(KWR)=AJ(M)*DEFS(K,N,M)
VAV(KWR)=VDA-VF(KWR)-VOLEV+VOREF(KWR)-VAREM(KWR)-VNDEV
510 CONTINUE
DO 520 K=1,NR
VOREFT=VCREFT+VOREF(K)
520 VAVRET=VAVRET+VAV(K)+VAREM(K)
VOPR2=AMIN1(VOPR2,AJ(M)*(DEREN+DREST))
VAVM=AJ(M)*(DMEU(N,M)-DEREN-DREST)-VOREFT+VAVRET+VOPR2
VOPR2=VOPR2+AMAX1(0.,AJ(M)*DRESM-VAVM)
IF(VODEF)530,530,535
530 AJD=0.
GO TO 540
535 AJD=AMIN1(AJ(M),AJ(M)-T)*VOPR2/VCDEF
540 VTM=VTM+AJ(M)*Q
VM=VM+VAVM
VDF=VDF+VCPR2
DDF=DDF+AJD
DO 541 K=1,NR
VREF(K)=VREF(K)+VOREF(K)

```

```

VREM(K)=VREM(K)+VAREM(K)
DU(K)=DU(K)+AJU(K)
VDSUP(K)=VDSUP(K)+VDFSUP(K)
541 VV(K)=VV(K)+VAV(K)
699 CONTINUE
DMM=VTM/365.25
WRITE(6,6000)N,DMM,VM,VDF,DDF,(VREF(K),VREM(K),DU(K),VV(K),VDSUP(K,
1),K=1,NR)
6000 FORMAT(1X,I3,')',F5.0,2F7.0,'(',F4.0,')',3(';',3X,2F6.0,'(',F4.0,'
1)',F6.0,F4.0))
IF(DDF-30.)900,900,901
901 NAC=NAD+1
900 CONTINUE
WRITE(6,7000)NAD
7000 FORMAT(/5X,I3,2X,'FOIS UNE DEFAILLANCE PRINCIPALE DE PLUS DE 30J D
1ANS UN AN')
IF(NAD-8)920,920,921
920 CONTINUE
GO TO 940
921 DO 941 K=KG,NC
941 LDEF(K)=MAX0(LDEF(K),4-L)
940 CONTINUE
600 CONTINUE
STOP
END

```

BESOINS EN MILLIERS DE M3/J : 247.0 POUR RENNES + 30. POUR LE MEU ; 3 RETENUES (STADE 4) ; CAP. REFOULEMENT : 40. MILLIERS DE M3/J

N	MODULE	AVAIL	DEF (EN.J)	REF1.DEST1.(EN.J)	AV1.DAD.	REF2.DEST2.(EN.J)	AV2.DAD.	REF3.DEST3.(EN.J)	AV3.DAD.
1)	584.142491.	7602.(48.)	0. 9494.(72.)	730. 0.;	7347. 8336.(47.)	304.255.;	0. 1916.(5.)	69. 85.	
2)	465.101097.	0.(0.)	0.14146.(117.)	983. 0.;	6558.10327.(51.)	365.178.;	0. 3793.(11.)	91. 60.	
3)	1047.340964.	0.(0.)	0. 4204.(63.)	17224. 0.;	1740. 0.(0.)	123248.121.;	1394. 0.(0.)	8912. 42.	
4)	432.122655.	0.(0.)	0.17611.(98.)	8916. 0.;	1250.13569.(50.)	9205.105.;	46. 4835.(16.)	3802. 26.	
5)	330. 67146.	8072.(42.)	0.16056.(105.)	926. 0.;	5513.10491.(34.)	365.103.;	0. 7891.(23.)	91. 24.	
6)	316. 65104.	15323.(65.)	0.15416.(115.)	820. 0.;	5002.10502.(40.)	334.222.;	0. 4648.(13.)	84. 70.	
7)	25. 6037.	90495.(356.)	0. 811.(4.)	93. 0.;	0. 1529.(7.)	31.731.;	0. 695.(2.)	8.256.	
8)	548.127103.	0.(0.)	0.15331.(128.)	1096. 0.;	7208. 8950.(44.)	365.176.;	0. 0.(0.)	91. 59.	
9)	600.166036.	0.(0.)	0.16414.(142.)	6794. 0.;	3282. 5576.(29.)	6035.175.;	0. 0.(0.)	7045. 59.	

4 FOIS UNE DEFAILLANCE PRINCIPALE DE PLUS DE 10J DANS UN AN

BESOINS EN MILLIERS DE M3/J : 247.0 POUR RENNES + 30. POUR LE MEU ; 3 RETENUES (STADE 4) ; CAP. REFOULEMENT : 20. MILLIERS DE M3/J

N	MODULE	AVAIL	DEF (EN.J)	REF1.DEST1.(EN.J)	AV1.DAD.	REF2.DEST2.(EN.J)	AV2.DAD.	REF3.DEST3.(EN.J)	AV3.DAD.
1)	584.146131.	10589.(63.)	0. 9494.(72.)	730. 0.;	3708. 5379.(31.)	273.255.;	0. 1917.(9.)	69. 85.	
2)	465.104293.	2111.(10.)	0.14146.(117.)	983. 0.;	3361. 7872.(39.)	365.178.;	0. 4137.(20.)	91. 60.	
3)	1047.339702.	0.(0.)	0. 4204.(63.)	17224. 0.;	1120. 0.(0.)	21705.121.;	986. 0.(0.)	8164. 42.	
4)	432.123252.	0.(0.)	0.17611.(98.)	8916. 0.;	694.13328.(49.)	9205.105.;	5. 5075.(17.)	3802. 26.	
5)	330. 69859.	10861.(53.)	0.16056.(105.)	926. 0.;	2799. 7954.(24.)	365.103.;	0. 7639.(22.)	91. 24.	
6)	316. 67568.	17571.(73.)	0.15416.(115.)	820. 0.;	2537. 8282.(31.)	304.222.;	0. 4649.(17.)	84. 70.	
7)	25. 6037.	90823.(357.)	0. 811.(4.)	93. 0.;	0. 1201.(5.)	31.731.;	0. 695.(2.)	8.256.	
8)	548.130645.	0.(0.)	0.15331.(128.)	1096. 0.;	3666. 7966.(38.)	365.176.;	0. 984.(1.)	91. 59.	
9)	600.163760.	0.(0.)	0.16414.(142.)	6794. 0.;	2215. 5576.(29.)	3671.175.;	0. 0.(0.)	6065. 59.	

5 FOIS UNE DEFAILLANCE PRINCIPALE DE PLUS DE 10J DANS UN AN

BESOINS EN MILLIERS DE M3/J : 247.0 POUR RENNES + 30. POUR LE MEU ; 2 RETENUES (STADE 3) ; CAP. REFOULEMENT : 60. MILLIERS DE M3/J

N	MODULE	AVAIL	DEF (EN.J)	REF1.DEST1.(EN.J)	AV1.DAD.	REF2.DEST2.(EN.J)	AV2.DAD.	REF3.DEST3.(EN.J)	AV3.DAD.
1)	584.138916.	6562.(42.)	0. 9494.(72.)	730. 0.;	10923.11269.(62.)	304.255.;			
2)	465. 98925.	2288.(11.)	0.14146.(117.)	983. 0.;	8802.11832.(58.)	437.178.;			
3)	1047.334427.	0.(0.)	0. 4204.(63.)	17224. 0.;	2360. 0.(0.)	24757.121.;			
4)	432.118467.	4655.(23.)	0.17611.(98.)	8916. 0.;	1773.13749.(50.)	9205.105.;			
5)	330. 64104.	13488.(64.)	0.16056.(105.)	926. 0.;	8143.12965.(44.)	365.103.;			
6)	316. 63417.	18441.(76.)	0.15416.(115.)	820. 0.;	6689.12023.(45.)	334.222.;			
7)	25. 6037.	90794.(357.)	0. 811.(4.)	93. 0.;	0. 1841.(8.)	31.731.;			
8)	548.124478.	0.(0.)	0.15331.(128.)	1096. 0.;	9857. 8950.(44.)	390.176.;			
9)	600.161310.	0.(0.)	0.16414.(142.)	6794. 0.;	2628. 5576.(29.)	7609.175.;			

6 FOIS UNE DEFAILLANCE PRINCIPALE DE PLUS DE 10J DANS UN AN