

**CALCUL DES LIMITES DE VOLUME D'EAU A  
RESPECTER DANS LES RESERVOIRS YONNE,  
SEINE, AUBE ET MARNE EN FONCTION DES  
OBJECTIFS DE GESTION VISES A L'AVAL**

**CONTRIBUTION AU PROJET CLIMAWARE**

Jean-Claude Bader

IRD/G-Eau

Le 21/05/2013

## TABLE DES MATIERES

1	Objectif et résumé .....	4
2	Notations.....	5
3	Donnees .....	8
4	Méthode.....	9
4.1	Reconstitution des débits naturels dans les cours d'eau au droit des prises et des restitutions .....	9
4.2	Limites imposées par les contraintes et consignes de gestion locales sur le débit stocké net dans un réservoir. ....	11
4.3	Repartition idéale du stockage net dans plusieurs réservoirs pour atteindre un objectif de débit commun localisé à l'aval.....	12
4.4	Débit idéal pris, restitué et produit à la restitution par chaque ouvrage compte tenu des contraintes et consignes locales et de l'objectif de débit aval .....	14
4.5	Etat de remplissage à respecter dans les réservoirs, leur permettant de réaliser au mieux un objectif commun défini à l'aval (laminage ou soutien de débit).....	15
4.5.1	Principes.....	15
4.5.2	Calcul à rebours des volumes stockés maximaux $V_{obj}$ à ne pas dépasser, compte tenu de la capacité du réservoir, pour ne pas empêcher le meilleur laminage possible par la suite .....	16
4.5.3	Evaluation du manque de capacité du réservoir .....	17
4.5.4	Evaluation des échecs inévitables de laminage.....	18
4.5.5	Echecs supplémentaires de laminage entraînés par un volume d'eau supérieur à $V_{obj}$ dans le réservoir.....	19
4.5.6	Valeur maximale $V_{op}$ du volume d'eau présent dans le réservoir, produit par une gestion visant prioritairement l'objectif de laminage immédiat et secondairement sa meilleure réalisation possible par la suite .....	19
4.5.7	Intérêt des résultats obtenus pour la gestion opérationnelle des réservoirs ..	20
4.5.8	Utilisation de la méthode dans le cas d'un objectif de soutien de débit .....	21
5	Mise en œuvre de la méthode.....	24
5.1	Fichiers de paramètres utilisés en entrée du programme .....	24
5.1.1	Fichier concernant la station objectif.....	24

5.1.2	Fichiers concernant les contraintes et consignes de gestion locales des réservoirs .....	24
5.1.3	Fichiers concernant les réseaux locaux de stations encadrant les réservoirs	25
5.1.4	Fichier décrivant les fréquences désirées pour l'analyse statistique des résultats	26
5.2	Fichier de données utilisées en entrée du programme .....	27
5.3	Fichier d'objectif utilisé en entrée du programme.....	28
5.4	Exécution du programme .....	28
5.5	Fichiers de résultats .....	29
5.5.1	Fichiers décrivant les conditions du calcul .....	29
5.5.2	Fichiers de chroniques journalières de résultats .....	29
5.5.3	Fichiers de statistiques de résultats .....	30

# 1 OBJECTIF ET RESUME

Le problème abordé ici concerne les limitations inférieures ou supérieures du volume d'eau qu'il convient de respecter dans différents réservoirs à un instant donné, pour qu'il soit possible par la suite de satisfaire du mieux possible, à l'aide de ceux-ci, un objectif commun de gestion de débit défini à l'aval. Pour un objectif de soutien d'étiage ou de laminage de crue, ce sont respectivement les valeurs minimales et maximales du volume d'eau à conserver dans les réservoirs que l'on cherche à déterminer.

La méthode proposée exploite les chroniques journalières du débit naturel des cours d'eau à différentes stations du bassin, parmi lesquelles doivent figurer la station aval où est défini l'objectif, ainsi que certaines stations permettant de calculer les débits naturels aux points de prise et de restitution des différents réservoirs.

A partir de la chronique de débit naturel à la station aval, on calcule par différence avec l'hydrogramme objectif une chronique de débit à soustraire ou rajouter au débit naturel pour atteindre en permanence l'objectif de gestion à cette station. Cette chronique correspond à un débit à stocker à l'amont (au sens algébrique), que l'on répartit de façon théorique entre les différents réservoirs en tenant compte des temps de propagation d'écoulement entre leurs points de restitution dans le réseau et la station aval. Cette répartition est faite au meilleur prorata possible des capacités des différents réservoirs, dans le respect des différentes contraintes et consignes locales de chacun d'entre eux (limites de débitance des canaux de prise et de restitution, débit réservé et de référence à l'aval immédiat des points de prise et de restitution). Dès cette étape du calcul, certaines impossibilités de satisfaire l'objectif peuvent être observées, correspondant à des défaillances inévitables absolues (par exemple : seuil de laminage de crue dépassé du seul fait d'apports naturels non contrôlés par des réservoirs). On obtient donc pour chaque réservoir une chronique de débit stocké idéal permettant de réaliser du mieux possible, par la contribution de tous les réservoirs, l'objectif de gestion défini à l'aval.

Pour chaque réservoir, la chronique de débit stocké idéal est utilisée ensuite pour calculer en sens chronologique inverse, les valeurs extrêmes de volume d'eau présent les plus compatibles possibles avec ce débit stocké. Par un calcul itératif, la valeur initiale de cette chronique de volume est déterminée de façon à influencer de façon neutre les résultats, en coïncidant avec la médiane des valeurs obtenues pour le même quantième. A cette étape du calcul, certaines impossibilités de reproduire le débit stocké idéal peuvent être observées, du fait d'une capacité trop faible du réservoir. Elles entraînent des défaillances inévitables de gestion, qui viennent s'ajouter aux défaillances inévitables absolues déjà citées.

Enfin, la chronique des volumes extrêmes mentionnée ci-dessus est analysée de façon statistique pour définir des chroniques annuelles iso-fréquence de volume. Celles-ci peuvent être utilisées comme aide à la gestion en temps réel en avenir inconnu, puisqu'elles indiquent pour chaque jour de l'année, et selon quelle fréquence, la valeur minimale ou maximale de volume d'eau qu'il convient de respecter dans le réservoir pour pouvoir satisfaire du mieux possible l'objectif commun de gestion par la suite.

On décrit l'utilisation du programme VGEST qui permet d'appliquer la méthode pour un groupe de un à quatre réservoirs visant un objectif commun de gestion défini à l'aval.

## 2 NOTATIONS

D : délai de propagation de l'écoulement entre le point de restitution du réservoir dans le cours d'eau et la station située à l'aval du système, où est localisé l'objectif de gestion commun aux différents réservoirs

Dam : délai de propagation d'écoulement dans le cours d'eau entre les stations amont et aval de débits naturels  $Q_{am}$  et  $Q_{av}$

Dint : délai de propagation d'écoulement entre la station intermédiaire et la station aval de débits naturels  $Q_{int}$  et  $Q_{av}$

DM : délai de propagation d'écoulement dans le cours d'eau entre le point de prise du réservoir et la station aval de débit naturel  $Q_{av}$

DV : délai de propagation d'écoulement dans le cours d'eau entre le point de restitution du réservoir et la station aval de débit naturel  $Q_{av}$

dT : incrément de temps

i : indice correspondant au réservoir de rang i (compris entre 1 et K)

K : nombre de réservoirs situés à l'amont de la station où est défini l'objectif de débit

$Q_{am}$  : débit naturel du cours d'eau à la première station située à l'amont de la restitution du réservoir

$Q_{av}$  : débit naturel du cours d'eau à la première station située à l'aval de la restitution du réservoir

$Q_{def0}$  : excès (resp. manque) de débit inévitable absolu à la station aval par rapport à l'objectif de laminage (resp. soutien) de débit, dû aux contraintes et consignes de gestion locales des réservoirs, et obtenu quelles que soient les capacités de ces derniers

$Q_{def1}$  : excès (resp. manque) de débit inévitable à la station aval par rapport à l'objectif de laminage (resp. soutien) de débit, dû aux contraintes et consignes de gestion des réservoirs et à leur manque de capacité

$Q_e$  : débit du canal de prise

$Q_{e1}$  : débit minimal du canal de prise, imposé par les contraintes et consignes de gestion locales

$Q_{e2}$  : débit maximal du canal de prise imposé par les contraintes et consignes de gestion locales

$Q_{emax}$  : débitance maximale du canal de prise

$Q_{emin}$  : débitance minimale du canal de prise (nulle en principe, sauf cas très particulier)

$Q_{int}$  : débit naturel à une station intermédiaire, située sur un affluent rejoignant le cours d'eau entre le point de restitution du réservoir et la première station située à l'aval de ce point

$Q_{Mnat}$  : débit naturalisé du cours d'eau au point de prise du réservoir

QMref : débit de référence du cours d'eau juste à l'aval de la prise (maximum à ne pas dépasser si possible)

QMres : débit réservé du cours d'eau juste à l'aval de la prise (minimum à maintenir si possible)

Qnat : débit naturel à la station située à l'aval du système, où est localisé l'objectif de débit

Qobj : objectif de débit visé à la station située à l'aval du système

Qs : débit du canal de restitution

Qsmax : débitance maximale du canal de restitution

Qsmin : débitance minimale du canal de restitution (nulle en principe, sauf cas très particulier)

QST : débit stocké net dans le réservoir (positif ou négatif)

QST0 : stockage net (positif ou négatif) de débit par rapport au régime naturel, à répartir entre plusieurs réservoirs proportionnellement à leurs volumes respectifs

QSTmax : valeur maximale du débit stocké net dans le réservoir, compte tenu des contraintes et consignes locales

QSTmin : valeur minimale du débit stocké net dans le réservoir, compte tenu des contraintes et consignes locales

QSTobj : débit (positif ou négatif) à soustraire à celui du régime naturel à la station aval du système pour atteindre l'objectif

Qsup : débit des apports intermédiaires reçus par le cours d'eau entre les points de prise et de restitution

QV : débit du cours d'eau influencé par le réservoir, juste à l'aval de la restitution

QVdef : excès (resp. manque) de débit au point restitution d'un réservoir (par rapport à la valeur idéale imposée par l'objectif commun de laminage (resp. soutien) aval), dû au manque de capacité du réservoir.

QVnat : débit naturalisé du cours d'eau au point de restitution du réservoir

QVref : débit de référence du cours d'eau juste à l'aval de la restitution (maximum à ne pas dépasser si possible)

QVres : débit réservé du cours d'eau juste à l'aval de la restitution (minimum à maintenir si possible)

Sam : superficie de bassin versant contrôlé par la station amont de débit naturel Qam

Sav : superficie de bassin versant contrôlée par la station aval de débit naturel Qav

Sint : superficie de bassin versant contrôlée par la station intermédiaire de débit naturel Qint

SM : superficie de bassin versant du cours d'eau au point de prise du réservoir

SV : superficie de bassin versant du cours d'eau au point de restitution du réservoir

T : temps

Tinit : instant initial du calcul

Tfin : instant final du calcul

Vdef : manque de capacité du réservoir en dessous du fond (resp. au dessus du niveau de débordement), empêchant celui-ci de disposer du volume vide (resp. du stock d'eau) nécessaire pour remplir ensuite du mieux possible son rôle (c.-à-d. en limitant les échecs aux seuls échecs inévitables absolus) pour l'objectif commun de laminage (resp. soutien) aval

Vges : volume d'eau présent dans le réservoir, forcément atteint ou dépassé (resp. non dépassé) par une gestion préoccupée de la satisfaction immédiate d'un objectif de laminage (resp. soutien) de débit

Vobj : volume d'eau maximal (resp. minimal) qu'on puisse maintenir dans le réservoir sans compromettre les possibilités de réaliser du mieux possible l'objectif commun de laminage (resp. soutien) aval par la suite

Vobj0 : identique à Vobj, dans le cas fictif d'une capacité de réservoir sans limite

Vop : volume d'eau maximal (resp. minimal) pouvant être produit par une gestion du réservoir visant prioritairement la réalisation au mieux de l'objectif commun de laminage (resp. soutien) de débit dans l'immédiat, et secondairement sa meilleure réalisation possible par la suite

Vtot : volume total du réservoir

### 3 DONNEES

Les données disponibles sont présentées dans les tableaux 3.A à 3.C ci-dessous et en annexe.

rivière	station	débit naturel (nom)	temps de propagation jusqu'à Méry sur Seine		superficie de bassin versant	
			(nom)	(heure)	(nom)	(km <sup>2</sup> )
Seine	Méry sur Seine (aval)	Qav			Sav	3899.6
Seine	restitution	QVnat	DV	34.0	SV	2900.3
Seine	prise	QMnat	DM	60.0	SM	2384.2
Seine	Bar sur Seine (amont)	Qam	Dam	65.0	Sam	2340.4

Tableau 3.A : données concernant les stations voisines du réservoir Seine

rivière	station	débit naturel (nom)	temps de propagation jusqu'à Arcis sur Aube		superficie de bassin versant	
			(nom)	(heure)	(nom)	(km <sup>2</sup> )
Aube	Arcis sur Aube (aval)	Qav			Sav	3594.6
Aube	restitution	QVnat	DV	17.0	SV	2529.0
Aube	prise	QMnat	DM	47.0	SM	1572.0
Aube	Trannes (amont)	Qam	Dam	49.0	Sam	1557.1
Voire	Lassicourt (intermédiaire)	Qint	Dint	17.0	Sint	876.5

Tableau 3.B : données concernant les stations voisines du réservoir Aube

rivière	station	débit naturel (nom)	temps de propagation jusqu'à Châlons sur Marne		superficie de bassin versant	
			(nom)	(heure)	(nom)	(km <sup>2</sup> )
Marne	Châlons sur Marne (aval)	Qav			Sav	6291.5
Marne	restitution 1	QVnat1	DV1	31.0	SV1	2515.2
Marne	Saint Dizier (amont 1)	Qam1	Dam1	42.0	Sam1	2347.5
Marne	prise 1	QMnat1	DM1	42.0	SM1	2289.9
Blaise	restitution 2	QVnat2	DV2	31.0	SV2	533.2
Blaise	prise 2	QMnat2	DM2	45.0	SM2	485.4
Blaise	Louvemont (amont 2)	Qam2	Dam2	45.0	Sam2	461.7
Saulx	Vitry (intermédiaire)	Qint	Dint	42.0	Sint	2109.1

Tableau 3.C: données concernant les stations voisines du réservoir Marne

## 4 METHODE

### 4.1 RECONSTITUTION DES DEBITS NATURELS DANS LES COURS D'EAU AU DROIT DES PRISES ET DES RESTITUTIONS

Les calculs effectués plus bas utilisent les débits naturalisés  $QM_{nat}$  et  $QV_{nat}$  des cours d'eau aux points de prise et de restitution de chaque réservoir, estimés dans l'hypothèse de l'absence de ce réservoir. On les évalue à partir des débits naturalisés connus aux stations voisines (et estimés avec la même hypothèse), en supposant une augmentation de débit proportionnelle à la superficie de bassin versant le long du cours d'eau et en tenant compte des temps de propagation entre les stations. Dans tout ce qui suit, le débit stocké dans le réseau d'écoulement (cours d'eau et canaux de prise et de restitution) est considéré comme négligeable devant le débit stocké dans les réservoirs. Il n'en est donc pas tenu compte.

Pour le réservoir Yonne, qui est implanté directement sur le cours d'eau et en contrôle tout l'écoulement, les débits  $QM_{nat}$  et  $QV_{nat}$  sont confondus et correspondent aux débits naturels connus à la station de Chaumard.

Pour chaque réservoir implanté en dérivation avec une prise et une restitution sur un même cours d'eau (réservoirs Aube et Seine, fig. 4.1.A),  $QM_{nat}$  et  $QV_{nat}$  sont évalués ainsi (avec  $Q_{int}$  et  $S_{int}$  nuls pour Seine) :

$$QM_{nat}(T) = \max(0 ; Q_{am}(t+DM-Dam) + (Q_{av}(T+DM) - Q_{int}(T+DM-Dint) - Q_{am}(T+DM-Dam)) * (SM - Sam) / (Sav - Sint - Sam)) \quad [1]$$

$$QV_{nat}(T) = \max(0 ; Q_{am}(T+DV-Dam) + (Q_{av}(T+DV) - Q_{int}(T+DV-Dint) - Q_{am}(T+DV-Dam)) * (SV - Sam) / (Sav - Sint - Sam)) \quad [2]$$

Enfin, le réservoir Marne contrôle l'écoulement de la Marne et de la Blaise avec deux prises et deux restitutions (fig. 4.1.B, partie gauche). On considère pour ce réservoir un seul débit global  $QM_{nat}$  de cours d'eau à la prise, égal à la somme des débits  $QM_{nat1}$  et  $QM_{nat2}$  aux prises respectives sur la Marne et sur la Blaise. En première approximation, on suppose par ailleurs que les points de restitution dans la Marne et la Blaise, situés respectivement à moins de 500 m et 14 km de la confluence Marne/Blaise, sont confondus avec celle-ci (fig. 4.1.B, partie droite). Ceci permet comme pour la prise de considérer un débit naturel global  $QV_{nat}$  à une unique restitution, obtenu en sommant les débits  $QV_{nat1}$  et  $QV_{nat2}$  aux restitutions respectives. Le détail des calculs est donné ci-dessous :

$$QM_{nat1}(T) = \max(0 ; Q_{am1}(T+DM1-Dam1) + (Q_{av}(T+DM1) - Q_{int}(T+DM1-Dint) - Q_{am2}(T+DM1-Dam2) - Q_{am1}(T+DM1-Dam1)) * (SM1 - Sam1) / (Sav - Sint - Sam1 - Sam2)) \quad [3]$$

$$QM_{nat2}(T) = \max(0 ; Q_{am2}(T+DM2-Dam2) + (Q_{av}(T+DM2) - Q_{int}(T+DM2-Dint) - Q_{am2}(T+DM2-Dam2) - Q_{am1}(T+DM2-Dam1)) * (SM2 - Sam2) / (Sav - Sint - Sam1 - Sam2)) \quad [4]$$

$$QV_{nat1}(T) = \max(0 ; Q_{am1}(T+DV1-Dam1) + (Q_{av}(T+DV1) - Q_{int}(T+DV1-Dint) - Q_{am2}(T+DV1-Dam2) - Q_{am1}(T+DV1-Dam1)) * (SV1 - Sam1) / (Sav - Sint - Sam1 - Sam2)) \quad [5]$$

$$QV_{nat2}(T) = \max(0 ; Q_{am2}(T+DV2-Dam2) + (Q_{av}(T+DV2) - Q_{int}(T+DV2-Dint) - Q_{am2}(T+DV2-Dam2) - Q_{am1}(T+DV2-Dam1)) * (SV2 - Sam2) / (Sav - Sint - Sam1 - Sam2)) \quad [6]$$

$$QM_{nat}(T) = QM_{nat1}(T) + QM_{nat2}(T) \quad [7]$$

$$QVnat(T) = QVnat1(T) + QVnat2(T)$$

[8]

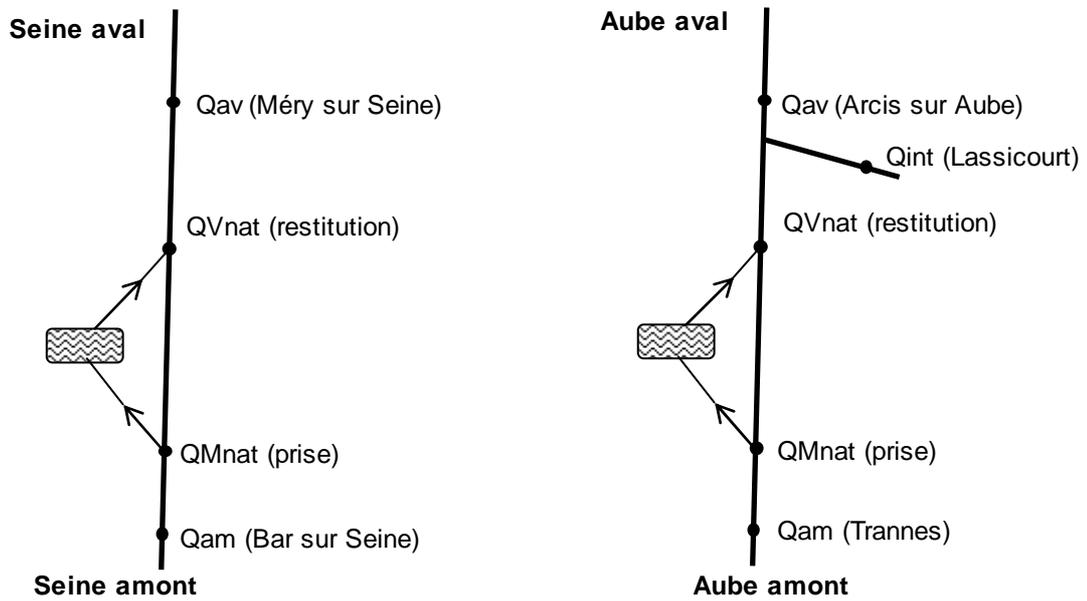


Figure 4.1.A : schéma localisant les débits naturels des cours d'eau autour des réservoirs Seine et Aube

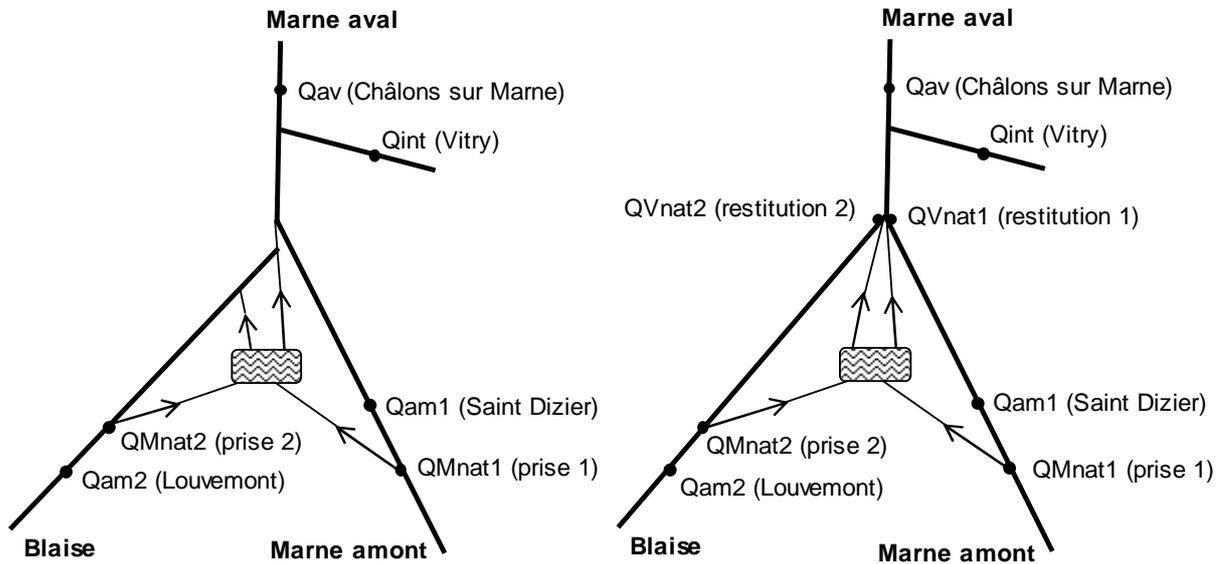


Figure 4.1.B : schéma localisant les débits naturels des cours d'eau autour du réservoir Marne (configuration réelle à gauche et simplification adoptée pour les calculs, à droite)

## 4.2 LIMITES IMPOSEES PAR LES CONTRAINTES ET CONSIGNES DE GESTION LOCALES SUR LE DEBIT STOCKE NET DANS UN RESERVOIR.

Dans tout ce qui suit, on néglige le délai de propagation d'écoulement dans le cours d'eau entre les points de prise et de restitution. On considère par ailleurs un sens d'écoulement irréversible dans tout le réseau encadrant le réservoir. Dans ce cas, le débit  $Q_e$  du canal de prise ne peut à aucun moment excéder le débit naturel  $Q_{Mnat}$  du cours d'eau au point de prise. Cette règle, qui prévaut sur toutes les autres, constitue une contrainte de gestion de priorité absolue. Les autres contraintes de gestion concernant le canal de prise sont sa débitance minimale  $Q_{emin}$  (nulle sauf cas très particulier) et sa débitance maximale  $Q_{emax}$  (imposée par les caractéristiques physiques du canal et de la prise), toutes deux supposées indépendantes du niveau de plan d'eau dans le réservoir. Compte tenu de leur ordre de priorité, ces contraintes imposent les inégalités suivantes au débit  $Q_e$  du canal de prise :

$$\min(Q_{Mnat}, Q_{emin}) \leq Q_e \leq \min(Q_{Mnat}, Q_{emax}) \quad [9]$$

Les consignes de débit réservé ( $Q_{Mres}$ ) et de référence ( $Q_{Mref}$ ) définis juste à l'aval de la prise consistent à faire respecter si possible les inégalités suivantes :

$$Q_{Mnat} - Q_e \geq Q_{Mres} \Rightarrow Q_e \leq Q_{Mnat} - Q_{Mres} \quad \text{si possible} \quad [10]$$

$$Q_{Mnat} - Q_e \leq Q_{Mref} \Rightarrow Q_e \geq Q_{Mnat} - Q_{Mref} \quad \text{si possible} \quad [11]$$

Dans tous les cas, les contraintes de gestion sont prioritaires par rapport aux consignes (ce qui signifie que les premières peuvent, dans certains cas, empêcher les secondes d'être respectées). Suivant ce principe (respect absolu des contraintes, et meilleur respect possible des consignes), la combinaison des différentes inégalités donne :

$$Q_{e1} \leq Q_e \leq Q_{e2} \quad [12]$$

$$\text{Avec : } Q_{e2} = \min(\min(Q_{Mnat}, Q_{emax}) ; \max(\min(Q_{Mnat}, Q_{emin}) ; Q_{Mnat} - Q_{Mres})) \quad [13]$$

$$Q_{e1} = \max(\min(Q_{Mnat}, Q_{emin}) ; \min(\min(Q_{Mnat}, Q_{emax}) ; Q_{Mnat} - Q_{Mref})) \quad [14]$$

Les contraintes de gestion concernant le canal de restitution sont sa débitance minimale  $Q_{smin}$  (nulle sauf cas très particulier) et sa débitance maximale  $Q_{smax}$ . Ces débitances extrêmes, supposées indépendantes du niveau de plan d'eau dans le réservoir, imposent les inégalités suivantes au débit  $Q_s$  du canal de restitution :

$$Q_{smin} \leq Q_s \leq Q_{smax} \quad [15]$$

Quant à elles, les consignes de gestion applicables à l'aval immédiat du point de restitution (débit réservé  $Q_{Vres}$  et de référence  $Q_{Vref}$ ) consistent à faire respecter si possible les inégalités suivantes au débit  $Q_V$  du cours d'eau :

$$Q_{Vres} \leq Q_V \leq Q_{Vref} \quad [16]$$

Par définition, le débit  $Q_{ST}$  stocké net dans le réservoir, soutiré au débit naturel du cours d'eau au point de restitution, s'exprime ainsi de façon algébrique :

$$Q_{ST} = Q_{Vnat} - Q_V \quad [17]$$

Par ailleurs, avec les hypothèses retenues (débit stocké négligeable dans le réseau ; temps de propagation nul entre prise et restitution), le principe de conservation de volume impose les deux égalités suivantes:

$$QV_{nat} = QM_{nat} + Q_{sup} \quad [18]$$

$$QV = QM_{nat} - Q_e + Q_{sup} + Q_s \quad [19]$$

Les relations 18 et 19 donnent :

$$Q_e - Q_s = QM_{nat} + Q_{sup} - QV = QV_{nat} - QV \quad [20]$$

Par ailleurs, les relations 17 et 20 donnent :

$$QST = Q_e - Q_s \quad [21]$$

D'après cette relation, les contraintes et consignes concernant la prise (relations 12), ajoutées aux contraintes concernant la restitution (relations 15), imposent donc de façon absolue l'encadrement suivant pour le débit soutiré QST :

$$Q_{e1} - Q_{smax} \leq QST \leq Q_{e2} - Q_{smin} \quad [22]$$

D'après la relation 17, les consignes concernant la restitution (relations 16) reviennent à respecter du mieux possible l'encadrement suivant de QST :

$$QV_{nat} - QV_{ref} \leq QST \leq QV_{nat} - QV_{res} \quad [23]$$

Le respect absolu des relations 22, qui sont prioritaires, combiné au meilleur respect possible des consignes à la restitution (relations 23) donne l'encadrement suivant de QST :

$$QST_{min} \leq QST \leq QST_{max} \quad [24]$$

$$\text{Avec : } QST_{min} = \max(Q_{e1} - Q_{smax}, \min(Q_{e2} - Q_{smin}, QV_{nat} - QV_{ref})) \quad [25]$$

$$QST_{max} = \min(Q_{e2} - Q_{smin}, \max(Q_{e1} - Q_{smax}, QV_{nat} - QV_{res})) \quad [26]$$

### **4.3 REPARTITION IDEALE DU STOCKAGE NET DANS PLUSIEURS RESERVOIRS POUR ATTEINDRE UN OBJECTIF DE DEBIT COMMUN LOCALISE A L'AVAL**

On suppose ici qu'on souhaite obtenir dans un cours d'eau à une station donnée, un débit exactement égal au débit objectif  $Q_{obj}$  par la gestion appropriée de plusieurs réservoirs situés à l'amont et non disposés en série. Pour atteindre cet objectif, il faut soustraire au débit naturel de la station un certain débit, positif ou négatif, par stockage net dans les réservoirs concernés. La méthode proposée ici consiste à répartir ce stockage net dans les différents réservoirs en respectant de façon absolue les limites imposées par les contraintes et consignes locales de chacun d'entre eux (relation 24), au prorata (dans la mesure du possible) de leurs volumes respectifs et en tenant compte des temps de propagation d'écoulement entre leurs points de restitution et le lieu de l'objectif. On ne tient pas compte ici de l'état de remplissage effectif des réservoirs et c'est donc bien une valeur idéale qui est calculée pour le stockage net dans chacun d'entre eux.

Positif ou négatif, le débit  $QST_{obj}$  soustrait au régime naturel du cours d'eau à la station aval du système vérifie par définition l'égalité ci-dessous :

$$QST_{obj} = Q_{nat} - Q_{obj} \quad [27]$$

Pour que l'objectif soit atteint du mieux possible à l'aval au temps  $T$ , il faut et il suffit que la somme des débits stockés nets dans les réservoirs concernés, décalés des temps de propagation et considérés à partir d'ici comme idéaux, coïncide du mieux possible avec ce débit :

$$QST_{obj}(T) = \sum(QST_i(T-D_i)) \quad [28]$$

Selon les cas, les contraintes et consignes locales des différents réservoirs, qui prévalent sur l'objectif de gestion commun défini à l'aval, permettent ou non d'atteindre celui-ci :

**1<sup>er</sup> cas : impossibilité d'obtenir exactement le débit visé à l'aval, du fait d'un stockage net de débit trop fort imposé par les contraintes et consignes locales des ouvrages**

Ceci se produit quand l'inégalité suivante est vérifiée :

$$QST_{obj}(T) < \sum(QST_{min_i}(T-D_i)) \quad [29]$$

Le débit le plus proche possible de l'objectif  $Q_{obj}(t)$  est alors obtenu à la station aval avec le débit stocké idéal suivant dans chaque réservoir :

$$QST_i(T-D_i) = QST_{min_i}(T-D_i) \quad [30]$$

**2<sup>eme</sup> cas : impossibilité d'obtenir exactement le débit visé à l'aval, du fait d'un stockage net de débit trop faible imposé par les contraintes et consignes locales des ouvrages**

Ceci se produit quand l'inégalité suivante est vérifiée :

$$QST_{obj}(T) > \sum(QST_{max_i}(T-D_i)) \quad [31]$$

Le débit le plus proche possible de l'objectif  $Q_{obj}(t)$  est alors obtenu à la station aval avec le débit stocké idéal suivant dans chaque réservoir :

$$QST_i(T-D_i) = QST_{max_i}(T-D_i) \quad [32]$$

**3eme cas : les contraintes et consignes locales des ouvrages laissent la possibilité d'obtenir exactement le débit visé à l'aval**

Ceci se produit quand les inégalités suivantes sont vérifiées :

$$\sum(QST_{min_i}(T-D_i)) \leq QST_{obj}(T) \leq \sum(QST_{max_i}(T-D_i)) \quad [33]$$

Pour obtenir à la station aval un débit égal à  $Q_{obj}(t)$ , la règle proposée consiste alors stocker dans chaque réservoir le débit idéal suivant :

$$QST_i(T-D_i) = \min\{\max[QST_0 \times (V_{tot_i} / \sum V_{tot_i}) ; QST_{min_i}(T-D_i)] ; QST_{max_i}(T-D_i)\} \quad [34]$$

Dans cette formule,  $QST_0$  est une constante déterminée par encadrements successifs, dont la valeur doit permettre de vérifier la relation suivante :

$$QSTobj(T) = \sum ( \min \{ \max [ QST0 \times (Vtot_i / \sum Vtot_i) ; QSTmin_i(T-D_i) ] ; QSTmax_i(T-D_i) \} ) \quad [35]$$

Dans certains cas, il est possible de répartir le débit idéal à soustraire entre les réservoirs de façon parfaitement proportionnelle à leurs volumes. Ceci se produit quand les inégalités suivantes sont vérifiées pour chaque réservoir :

$$QSTmin_i(T-D_i) < QSTobj(T) \times (Vtot_i / \sum Vtot_i) < QSTmax_i(T-D_i) \quad [36]$$

Le débit  $QST0$  est alors égal à  $QSTobj(T)$  et le débit stocké dans chaque réservoir vaut :

$$QST_i(T-D_i) = QSTobj(T) \times (Vtot_i / \sum Vtot_i) \quad [37]$$

Mais dans tous les autres cas, la valeur de  $QST0$  diffère de  $QSTobj(T)$ . Une valeur supérieure à  $QSTobj(T)$  peut par exemple être nécessaire quand les contraintes et consignes locales de certains réservoirs y imposent au temps  $T-D_i$  un débit stocké inférieur à la part "normale"  $QSTobj(T) \times (Vtot_i / \sum Vtot_i)$ . Les autres réservoirs doivent alors assurer un stockage supérieur à leur part "normale" pour que le débit  $Qobj(T)$  soit exactement obtenu à la station aval du système.

### Conclusion

La règle proposée permet de réaliser de façon idéale un objectif commun de débit aval (c.-à-d. obtenir un débit le plus proche possible de l'objectif, compte tenu des contraintes et consignes de gestion locales des réservoirs situés à l'amont), en répartissant le stockage net idéal nécessaire dans les réservoirs au meilleur prorata possible de leurs volumes respectifs. Le calcul de ces stockages nets idéaux suppose que les débits naturels soient connus à la station aval au temps  $T$  et aux points de restitution aux temps  $T-D_i$  (avec  $D_i$  : temps de propagation entre ces points et la station aval). Ceci ne pose bien-sûr aucun problème quand on dispose comme ici, dans un calcul a posteriori, de chroniques de débits naturalisés pour ces différentes stations. Les difficultés spécifiques liées à l'utilisation en temps réel de la règle, ainsi que les améliorations envisageables dans ce cas (prise en compte de l'état de remplissage réel des réservoirs) ne sont pas abordées ici.

## 4.4 DEBIT IDEAL PRIS, RESTITUE ET PRODUIT A LA RESTITUTION PAR CHAQUE OUVRAGE COMPTE TENU DES CONTRAINTES ET CONSIGNES LOCALES ET DE L'OBJECTIF DE DEBIT AVAL

Pour chaque ouvrage, les valeurs idéales des débits  $Q_e$ ,  $Q_s$  et  $Q_V$  (pris, restitué et produit à l'aval immédiat du point de restitution) permettant d'obtenir à la station aval un débit le plus proche possible de l'objectif  $Q_{obj}$ , peuvent être calculées à partir du débit stocké idéal  $QST$  déterminé ci-dessus. Ainsi, le débit  $Q_e$  dans le canal de prise doit respecter les relations 12 (contraintes et consignes au point de prise). Le débit  $Q_s$  dans le canal de restitution doit quant à lui respecter les relations 15 (contraintes au point de restitution). Ces deux débits doivent également respecter la relation 21. Les relations 15 et 21 donnent :

$$Q_{smin} + QST \leq Q_e \leq Q_{smax} + QST \quad [38]$$

Combinée avec la relation 12, cette relation donne la fourchette des valeurs possibles pour  $Q_e$  :

$$\max(Q_{smin} + QST, Q_{e1}) \leq Q_e \leq \min(Q_{smax} + QST, Q_{e2}) \quad [39]$$

L'infériorité de  $Q_{smin}$  par rapport à  $Q_{smax}$ , celle de  $Q_{e1}$  par rapport à  $Q_{e2}$  et les relations 22 montrent que le système d'inéquations 39 a toujours au moins une solution  $Q_e$ . On retient finalement la valeur suivante pour le débit pris idéal:

$$Q_e = (\max(Q_{smin}+Q_{ST}, Q_{e1}) + \min(Q_{smax}+Q_{ST}, Q_{e2}))/2 \quad [40]$$

Le débit restitué idéal  $Q_s$  est quant à lui obtenu ainsi, en inversant la relation 21 :

$$Q_s = Q_e - Q_{ST} \quad [41]$$

La relation 39 permet de vérifier que la valeur de  $Q_s$  ainsi obtenue vérifie bien les contraintes de débitance du canal de restitution (relation 15).

Enfin, l'inversion de la relation 17 donne le débit idéal produit à l'aval immédiat de la restitution :

$$Q_V = Q_{Vnat} - Q_{ST} \quad [42]$$

## **4.5 ETAT DE REMPLISSAGE A RESPECTER DANS LES RESERVOIRS, LEUR PERMETTANT DE REALISER AU MIEUX UN OBJECTIF COMMUN DEFINI A L'AVAL (LAMINAGE OU SOUTIEN DE DEBIT)**

### **4.5.1 Principes**

On suppose que l'objectif de débit visé à la station aval du système est défini par un hydrogramme annuel reproduit à l'identique d'année en année. Dans le cas d'un objectif de laminage de débit, détaillé ci-dessous, l'hydrogramme correspond à un débit maximal qu'on souhaite ne jamais voir dépassé à la station aval. Dans le cas d'un objectif de soutien d'étiage, qu'on peut traiter par un raisonnement symétrique (résumé plus bas), l'hydrogramme correspond au contraire à un débit minimal qu'on souhaite voir toujours atteint ou dépassé à cette station.

A partir d'ici, pour simplifier la compréhension, c'est donc un objectif de laminage de débit qui est considéré, défini par l'hydrogramme  $Q_{obj}(T)$ . Dans ce cas, le débit  $Q_{STobj}$  défini par la relation 27 correspond à la valeur minimale de débit qu'il faut soustraire à l'écoulement naturel à la station aval pour que l'objectif de gestion soit atteint. A partir de  $Q_{STobj}(T)$ , on détermine pour chaque réservoir la valeur minimale souhaitable  $Q_{ST_i}(T-D_i)$  du débit stocké net (relation 30, 32 ou 34 selon les cas), ainsi que la valeur maximale souhaitable  $Q_{V_i}(T-D_i)$  de débit produit à l'aval du point de restitution (relation 42), permettant à l'objectif commun de laminage aval d'être respecté du mieux possible, compte tenu des contraintes et consignes locales des réservoirs. Le respect du débit stocké minimal  $Q_{ST_i}(T-D_i)$  constitue un objectif de laminage idéal assigné à chaque réservoir.

En temps réel, tant que  $Q_{ST_i}$  est négatif ou que le lac n'est pas plein, le gestionnaire d'un ouvrage est en mesure de satisfaire cet objectif idéal de laminage en effectuant un stockage net de débit supérieur ou égal à  $Q_{ST_i}$ . Ceci peut éventuellement conduire au remplissage complet du réservoir au bout d'un certain temps, avec le risque de ne pouvoir alors plus réaliser au mieux le laminage souhaité si celui-ci nécessite une valeur positive de  $Q_{ST_i}$ . Mais ce risque est assumé car la satisfaction immédiate de l'objectif prime sur sa satisfaction future.

Si le laminage considéré est l'unique objectif de gestion de l'ouvrage, la conduite à tenir consiste, tant que le réservoir n'est pas plein, à réaliser au mieux le laminage immédiat grâce à un débit stocké minimal égal à  $QST_i$ , ce qui compromet le moins possible les chances de réussite future. On maintient ainsi un lac aussi vide que possible en permanence, en ne stockant que le débit nécessaire pour le laminage immédiat.

Le problème se complique dès lors qu'on vise d'autres objectifs que le laminage, tels que soutien d'étiage ou production hydroélectrique, pour lesquels on doit veiller au contraire à maintenir un stock d'eau suffisant dans le réservoir. Dans un compromis visant à préserver les chances de réussite future pour les différents objectifs, le gestionnaire peut alors être amené à effectuer plus ou moins fréquemment un stockage net de débit supérieur à  $QST_i$  dans un réservoir partiellement rempli, ce qui augmente les risques d'obtenir à terme un réservoir plein ne permettant plus de réaliser le laminage idéal souhaité. On peut alors se demander à tout moment quel stock d'eau il convient de ne pas voir dépassé dans le réservoir pour ne pas compromettre la réussite du laminage idéal futur, ou encore quels sont les risques d'échec entraînés pour ce laminage idéal futur par un stock donné. Ces questions sont abordées ici par une analyse a posteriori de la chronique des débits stockés nets minimaux souhaitables  $QST_i$ , supposés connus entre les temps  $T_{init}$  et  $T_{fin}$ . Cette analyse repose sur les mêmes principes que certains travaux développés antérieurement par JC Bader (IRD) sur le même sujet pour le barrage de Manantali, implanté sur le fleuve Sénégal.

#### **4.5.2 Calcul à rebours des volumes stockés maximaux $V_{obj}$ à ne pas dépasser, compte tenu de la capacité du réservoir, pour ne pas empêcher le meilleur laminage possible par la suite**

Pour pouvoir réaliser au mieux l'objectif de laminage au temps  $T+D_i$  à la station aval, il faut d'après ce qui précède que le débit stocké net dans le réservoir au temps  $T$  soit supérieur ou égal à  $QST(T)$ . D'après le principe de conservation de masse, cette condition s'exprime ainsi avec le volume d'eau  $V_{obj}$  présent dans le réservoir aux instants  $T-dT$  et  $T+dT$  :

$$(V_{obj}(T+dT/2)-V_{obj}(T-dT/2))/dT \geq QST(T) \quad [43]$$

$$\Leftrightarrow V_{obj}(T-dT/2) \leq V_{obj}(T+dT/2)-dT \times QST(T) \quad [44]$$

Cette relation exprime, en fonction de  $V_{obj}(T+dT/2)$  et de  $QST(T)$ , la valeur qui ne doit pas être dépassée par  $V_{obj}(T-dT/2)$  pour que soit réalisé l'objectif idéal de laminage entre les instants  $T-dT/2$  et  $T+dT/2$ . Appliquée de façon itérative dans le sens chronologique inverse, entre les instants  $T_{fin}-dT/2$  et  $T_{init}-dT/2$  et pour un volume  $V_{obj}(T_{fin}+dT/2)$  donné, elle détermine ainsi la série des volumes maximaux présents dans le réservoir à chaque instant, qu'il aurait fallu ne jamais dépasser pour permettre de réaliser au mieux le laminage idéal assigné par la suite, compte tenu des contraintes et consignes locales :

$$V_{obj}(T-dT/2) = \min(V_{tot} ; \max(0 ; V_{obj}(T+dT/2)-dT \times QST(T))) \quad [45]$$

Afin que la série  $V_{obj}$  obtenue ne soit influencée que de façon neutre par la valeur initiale choisie arbitrairement pour  $V_{obj}(T_{fin}+dT/2)$ , on retient pour celle-ci une valeur correspondant à la médiane des volumes  $V_{obj}$  obtenus pour le même jour de l'année sur toute la période. La détermination de  $V_{obj}(T_{fin}+dT/2)$  vérifiant cette condition est faite par encadrements successifs, à partir d'une valeur initialisée à  $V_{tot}$ .

Les volumes  $V_{obj}$  obtenus (cf exemple, fig. 4.5.A(a)) présentent trois types de valeurs correspondant à des niveaux de réussite différents pour le rôle rempli par le réservoir dans le

laminage visé, selon la position du débit stocké net (fig. 4.5.B(a)) par rapport au débit stocké net idéal QST.

- Cas où :  $V_{obj}(T-dT/2)=V_{tot}$ . Ce volume correspondant au réservoir plein est obtenu avec un débit stocké net  $(V_{obj}(T+dT/2)-V_{obj}(T-dT/2))/dT$  strictement supérieur à  $QST(T)$  entre les instants  $T-dt/2$  et  $T+dT/2$ , qui permet de satisfaire au mieux le laminage aval compte tenu des contraintes et consignes locales. Entre ces instants, le réservoir fait plus qu'il ne lui est demandé, dépassant le rôle idéal qui lui est assigné pour l'objectif commun de laminage aval.
- Cas où :  $0 < V_{obj}(T-dT/2) < V_{tot}$ . Ce volume d'eau dans le réservoir est obtenu avec un débit stocké net  $(V_{obj}(T+dT/2)-V_{obj}(T-dT/2))/dT$  strictement égal à  $QST(T)$ , ce qui permet encore de satisfaire au mieux le laminage aval compte tenu des contraintes et consignes locales. Entre les instants  $T-dT$  et  $T+dT$ , le réservoir remplit exactement le rôle idéal qui lui est assigné pour l'objectif commun de laminage aval.
- Cas où :  $V_{obj}(T-dT/2) = 0$ . Ce volume correspondant au réservoir vide est obtenu avec un débit stocké net  $(V_{obj}(T+dT/2)-V_{obj}(T-dT/2))/dT$  inférieur à  $QST(T)$ , ce qui ne permet pas de satisfaire au mieux (compte tenu des contraintes et consignes locales) le laminage aval. Entre les instants  $T-dT$  et  $T+dT$ , le réservoir n'est pas en mesure de remplir complètement le rôle idéal qui lui est assigné pour cet objectif, par manque de capacité, car il aurait fallu pour cela de la capacité de stockage supplémentaire en dessous du fond. En pratique, un volume  $V_{obj}$  nul signifie que la situation d'échec suivante finit ensuite par arriver de façon inéluctable : impossibilité de stocker un débit suffisant pour le laminage, pour cause de réservoir plein.

A chaque instant,  $V_{obj}$  représente donc le volume d'eau maximal qu'il ne faut pas dépasser dans le réservoir, pour qu'il soit possible ensuite d'atteindre au mieux l'objectif idéal de laminage assigné, c'est-à-dire avec le moins d'échecs possible.

### **4.5.3 Evaluation du manque de capacité du réservoir**

On peut évaluer le manque de capacité qui ne permet pas au réservoir de remplir complètement son rôle idéal pour le laminage pendant toute la période. Il suffit pour cela de calculer une série fictive de volume d'eau maximal  $V_{obj0}$  à ne pas dépasser dans le réservoir, pouvant prendre des valeurs négatives (fig. 4.5.A(a)). Le calcul effectué en chronologie inversée et initialisé avec une valeur  $V_{obj0}(T_{final}+dT/2)$  identique à  $V_{obj}(T_{final}+dT/2)$  est effectué suivant le même principe que pour  $V_{obj}$  entre les temps  $T_{final}-dT/2$  et  $T_{init}-dT/2$ , en remplaçant toutefois la relation 45 par :

$$V_{obj0}(T-dT/2) = \min(V_{tot} ; V_{obj0}(T+dT/2)-dT \times QST(T)) \quad [46]$$

Cette chronique de  $V_{obj0}$  est ainsi obtenue avec un débit stocké toujours supérieur ou égal à  $QST$  (fig. 4.5.B(b)), qui permet au réservoir de remplir sans aucune défaillance l'objectif idéal de laminage qui lui est assigné.

A tout instant, le manque de capacité  $V_{def}$  du réservoir est alors donné par :

$$V_{def} = \max(0 ; -V_{obj0}) \quad [47]$$

#### 4.5.4 Evaluation des échecs inévitables de laminage

Par rapport à l'objectif  $Q_{obj}(T)$ , deux types de dépassement de débit peuvent intervenir à la station aval :

- Les dépassements dus aux seules contraintes et consignes locales des différents ouvrages peuvent être considérés comme inévitables absolus, puisqu'ils se produisent quelles que soient les capacités des réservoirs, quand l'inégalité 31 est vérifiée. Ils peuvent survenir par exemple dans le cas d'apports trop importants provenant de cours d'eau tributaires non contrôlés, ou à cause d'une débitance maximale trop faible sur le canal de prise de certains réservoirs.
- Aux dépassements inévitables absolus peuvent s'ajouter, éventuellement de façon simultanée, des dépassements dus au manque de capacité de certains réservoirs. Ces dépassements, dont certains sont également inévitables, se produisent quand un débit stocké net positif est nécessaire pour le laminage aval sur ces réservoirs, et que ceux-ci ne peuvent remplir leur rôle parce qu'ils sont déjà pleins.

Pour chaque réservoir, les dépassements minimaux inévitables dus au manque de capacité sont calculés à partir d'une simulation reproduisant une gestion réelle préoccupée de la satisfaction immédiate de l'objectif idéal de laminage assigné au réservoir (débit stocké supérieur ou égal à  $Q_{ST}$ ), et veillant au maintien d'un volume d'eau toujours aussi bas que possible. Par un calcul effectué dans le sens chronologique entre les instants  $T_{init}+dT/2$  et  $T_{fin}+dT/2$ , cette simulation produit la série des volumes d'eau minimaux  $V_{ges}$  présents dans le réservoir du fait de cette gestion (fig. 4.5.A(a)), à partir de la relation suivante déduite de la relation 43 vérifiée par  $V_{ges}$  comme par  $V_{obj}$  :

$$V_{ges}(T+dT/2) = \min(V_{tot} ; \max(0 ; V_{ges}(T-dT/2)+dT \times Q_{ST}(T))) \quad [48]$$

Selon le même principe que pour le calcul à rebours de  $V_{obj}$ , le calcul est initialisé par un volume  $V_{ges}(T_{init}-dT/2)$  dont la valeur est déterminée (par un processus d'encadrements successifs initialisé cette fois avec une valeur nulle) pour coïncider avec la médiane des valeurs de  $V_{ges}$  obtenues pour le même jour de l'année sur toute la période.

Les excès minimaux inévitables  $Q_{Vdef}$  de débit produit dans le cours d'eau au point de restitution (par rapport au débit produit idéal  $Q_V$  donné par la relation 42) du fait du manque de capacité du réservoir, surviennent quand les deux conditions suivantes sont réunies : réservoir plein ( $V_{ges}(T+dT/2)=V_{tot}$ ) et débit  $Q_{ST}(T)$  stocké net minimal nécessaire positif. Correspondant au dépassement du débit stocké (fig. 4.5.B(c)) par le débit stocké idéal  $Q_{ST}$ , ils vérifient :

$$Q_{Vdef}(T) = \max(0 ; Q_{ST}(T)-(V_{ges}(t+dT/2)-V_{ges}(T-dT/2))/dT) \quad [49]$$

Quant à eux, les excès inévitables absolus  $Q_{def0}$  de débit produits à la station aval du fait des contraintes et consignes de gestion locales des ouvrages (fig. 4.5.C), sont déterminés ainsi :

$$Q_{def0}(T) = \max(0 ; Q_{STobj}(T) - \sum(Q_{STmax_i}(T-D_i))) \quad [50]$$

Enfin, la combinaison de ces excès inévitables absolus avec les excès minimaux inévitables dus au manque de capacité des réservoirs produit à la station aval les excès inévitables  $Q_{def1}$  suivants (fig. 4.5.C):

$$Q_{def1}(T) = Q_{def0}(T) + \sum(Q_{Vdef_i}(T-D_i)) \quad [51]$$

#### **4.5.5 Echecs supplémentaires de laminage entraînés par un volume d'eau supérieur à Vobj dans le réservoir**

Le volume maximal Vobj présente trois types de valeurs, qui se distinguent selon leur position par rapport au volume maximal fictif Vobj0 ((fig. 4.5.A(b)) :

- Type A :  $V_{obj} = V_{obj0}$
- Type B1 :  $V_{obj} > \max(V_{obj0} ; 0)$
- Type B2 :  $V_{obj} = 0 > V_{obj0}$

Comme on l'a vu plus haut, Vobj est à tout instant le plus grand volume d'eau qu'on puisse maintenir dans le réservoir sans empêcher la possibilité de réaliser au mieux l'objectif commun de laminage aval par la suite. Un volume d'eau supérieur à Vobj à un instant donné entraîne inéluctablement certains échecs de laminage ultérieurs qui pourraient être évités dans le cas contraire, et qui viennent s'ajouter aux échecs inévitables suivants, variables selon le type de Vobj :

- type A : certains échecs inévitables absolus (dus aux contraintes et consignes de gestion locales des réservoirs)
- types B1 et B2 : certains échecs inévitables absolus et tout (zone B1) ou partie (zone B2) de certains échecs minimaux dus au manque de capacité du réservoir

#### **4.5.6 Valeur maximale Vop du volume d'eau présent dans le réservoir, produit par une gestion visant prioritairement l'objectif de laminage immédiat et secondairement sa meilleure réalisation possible par la suite**

A chaque instant, l'objectif idéal de laminage de débit assigné au réservoir impose deux règles au gestionnaire :

- Stocker, pendant un certain laps de temps, un débit supérieur à QST pour atteindre l'objectif dans l'immédiat
- Obtenir, à la fin de ce laps de temps, un volume d'eau inférieur à Vobj pour pouvoir atteindre au mieux l'objectif par la suite

Le suivi de ces deux règles produit une chronique de volume présent dans le réservoir, dont la borne supérieure Vop est donnée par (fig. 4.5.A(c)) :

$$Vop = \max (V_{obj} ; V_{ges}) \quad [52]$$

En effet, une évolution du volume conformément à Vobj permet de respecter les deux règles tant que Vobj est supérieur à Vges. Mais dès que cette inégalité n'est plus respectée, le respect simultané des deux règles devient impossible et c'est bien sûr la première qui prévaut. Or celle-ci impose un volume supérieur ou égal à Vges dans le réservoir.

Le volume Vop peut être considéré comme le volume produit par une gestion visant en priorité la satisfaction immédiate de l'objectif et secondairement sa satisfaction future, dans l'hypothèse d'un avenir entièrement connu. On peut donc le qualifier d'opérationnel optimal.

#### **4.5.7 Intérêt des résultats obtenus pour la gestion opérationnelle des réservoirs**

A condition d'être basés sur des données jugées représentatives des écoulements naturels actuels ou futurs, les résultats obtenus peuvent fournir une aide à la gestion des réservoirs, Il suffit de les interpréter de façon statistique pour pouvoir les exploiter dans un contexte d'avenir inconnu.

Pour certaines variables, les chroniques pluriannuelles de valeurs obtenues sont donc traduites en chroniques annuelles iso-fréquence (Qdef1 : fig. 4.5.D ; Vobj et Vop : fig. 4.5.E ; Vdef : 4.5.F). Cette traduction consiste dans un premier temps à élaborer, pour chaque jour de l'année (quantième), la fonction de répartition des valeurs obtenues pour ce jour sur la période entière de calcul. Les 365 fonctions de répartition ainsi obtenues permettent ensuite de construire des chroniques annuelles iso-fréquence, constituées chacune des valeurs non dépassées à une même fréquence sur l'ensemble des jours de l'année.

Quelques exemples d'interprétation de chroniques annuelles iso-fréquence sont donnés ci-dessous pour les variables Qdef1 et Vobj, qui sont les plus intéressantes pour la gestion opérationnelle. Basés sur les données du régime naturel observé de la période du 15/01/1964 au 10/11/1969, ils concernent un objectif de laminage à 800 m<sup>3</sup>/s du débit de la Seine à Paris Austerlitz, qu'on souhaiterait atteindre grâce aux réservoirs Yonne, Seine, Aube et Marne. La période de calcul est choisie volontairement très courte pour offrir une meilleure visibilité des chroniques pluri-annuelles de résultats (fig 4.5.A à 4.5.C), au détriment certes de leur représentativité statistique et de la régularité de leurs chroniques iso-fréquence.

Pour l'excédent minimal inévitable de débit Qdef1, la figure 4.5.D nous indique par exemple que :

- Une gestion correcte des réservoirs permet d'atteindre l'objectif (débit inférieur ou égal à 800 m<sup>3</sup>/s à Paris Austerlitz) de façon garantie du 6 mars au 20 décembre (valeur maximale de Qdef1 nulle)
- Le 28 janvier, le débit de la Seine à Paris Austerlitz court un risque non nul de dépasser 800 m<sup>3</sup>/s, du fait des contraintes et consignes locales des réservoirs et/ou de leurs capacités limitées. Le dépassement minimal de débit obtenu ce jour avec la meilleure gestion possible des réservoirs, atteint ou dépasse 239 m<sup>3</sup>/s une année sur 5 (point C) et 49 m<sup>3</sup>/s une année sur 3 (point B). Toujours inférieur ou égal à 568 m<sup>3</sup>/s (point D), il est nul (point A) moins de deux années sur trois (et plus d'une année sur deux au sens large)

La figure 4.5.E renseigne sur le volume d'eau présent Vobj qu'il faut statistiquement ne pas dépasser dans le réservoir Marne pour pouvoir ensuite satisfaire du mieux possible l'objectif idéal de laminage qui lui est assigné, autrement dit pour ne pas entraîner de défaillance ultérieure de laminage qui pourrait être évitée avec un volume plus faible. Les exemples suivants illustrent l'interprétation des chroniques annuelles iso-fréquence de Vobj :

- Le 25 janvier à 24 H, il faut que le volume d'eau présent soit inférieur ou égal aux valeurs suivantes dans le réservoir, pour que celui-ci puisse satisfaire ensuite du mieux possible son objectif de laminage : 340 hm<sup>3</sup> une année sur trois (point B) ; 276 hm<sup>3</sup> une année sur cinq (point C) ; 185 hm<sup>3</sup> dans le pire des cas (point D). Le dépassement de ces valeurs entraîne inéluctablement, à la fréquence indiquée, une défaillance ultérieure de laminage qui pourrait être évitée avec un volume plus faible.

Moins de deux années sur trois (et plus d'une année sur deux, au sens large), le fait de maintenir le réservoir entièrement rempli à cette date (point A) n'empêche pas celui-ci de satisfaire ensuite du mieux possible son objectif de laminage. Autrement dit, cette absence de volume vide entraîne plus d'une année sur trois (et moins d'une année sur deux au sens large) une défaillance ultérieure de laminage qui pourrait être évitée avec un volume vide non nul.

- Le 30 juin à 24 H (point E), l'absence de volume vide dans le réservoir n'empêche jamais celui-ci de satisfaire ensuite du mieux possible son objectif de laminage.
- Le 11 octobre à 24 H, l'absence de volume vide dans le réservoir (point F) empêche celui-ci, plus d'une année sur trois (et moins d'une année sur deux au sens large), de satisfaire ensuite du mieux possible son objectif de laminage. Cette meilleure satisfaction possible de l'objectif par la suite nécessite que le volume d'eau présent dans le réservoir à cette date soit inférieur ou égal à  $334 \text{ hm}^3$  une année sur trois (point G),  $273 \text{ hm}^3$  une année sur cinq (point H) et  $200 \text{ hm}^3$  dans le pire des cas (point I).
- Le 26 décembre à 24H, l'absence de volume vide dans le réservoir (point J) empêche celui-ci, plus de deux années sur trois (et moins de quatre années sur cinq au sens large), de satisfaire du mieux possible son objectif de laminage par la suite. Cette meilleure satisfaction possible ultérieure de l'objectif nécessite que le volume d'eau présent à cette date soit inférieur ou égal à  $350 \text{ hm}^3$  deux années sur trois (point K),  $277 \text{ hm}^3$  une année sur deux (point L) et  $46 \text{ hm}^3$  une année sur trois (point M). Moins d'une année sur trois (et plus d'une année sur cinq au sens large), le réservoir doit être vide (point N) pour pouvoir satisfaire ensuite du mieux possible son objectif de laminage.

#### **4.5.8 Utilisation de la méthode dans le cas d'un objectif de soutien de débit**

Dans le cas d'un objectif de soutien de débit, les résultats présentés ci-dessus pour le laminage peuvent être utilisés moyennant quelques différences mineures, concernant en particulier l'interprétation des valeurs obtenues.

En effet, le débit QST de chaque réservoir, toujours évalué de la même façon, représente cette fois la valeur maximale du débit stocké net qu'il ne faut pas dépasser pour atteindre au mieux l'objectif de soutien aval compte tenu des contraintes et consignes locales.

Toujours évaluée par un calcul itératif en chronologie inverse basé sur la relation 45 (mais avec un processus de détermination de  $V_{obj}(T_{fin}+dT/2)$  initialisé cette fois avec une valeur nulle au lieu de  $V_{tot}$ ), la série  $V_{obj}$  (fig. 4.5.G(a)) représente maintenant les volumes minimaux présents dans le réservoir qu'il aurait fallu à tout moment atteindre ou dépasser pour permettre la meilleure réalisation possible du soutien de débit assigné par la suite. Ce sont alors les valeurs de  $V_{obj}(T-dt/2)$  égales à  $V_{tot}$  (et non plus les valeurs nulles) qui sont obtenues avec un débit stocké défaillant, supérieur à QST entre les instants  $T+dT/2$  et  $T-dT/2$  (fig. 4.5.H(a)). Elles correspondent aux cas où, par manque de capacité, le volume entièrement plein du réservoir n'aurait pas suffi pour prévenir l'inévitabilité des situations d'échec suivantes : impossibilité de déstocker un débit suffisant pour le soutien, à cause d'un réservoir vide.

Le manque de capacité du réservoir est calculé comme pour le laminage, mais avec un volume fictif  $V_{obj0}$  (fig. 4.5.G(a)) évalué cette fois, au lieu de la relation 46, par la relation suivante qui donne un débit stocké toujours inférieur ou égal à QST (fig. 4.5.H(b)) :

$$Vobj0(T-dT/2) = \max(0 ; Vobj0(T+dT/2)-dT \times QST(T)) \quad [53]$$

Le manque de capacité Vdef correspondant vaut alors à tout instant :

$$Vdef = \max(0, Vobj0 - Vtot) \quad [54]$$

Les manques inévitables absolus de débit à la station aval par rapport à l'objectif Qobj(T), toujours dus aux contraintes et consignes locales des réservoirs, se produisent cette fois quand l'inégalité 29 est vérifiée. Au lieu de la relation 50, ils sont alors donnés par :

$$Qdef0 = \max(0 ; \sum(QSTmin_i(T-D_i)) - QSTobj(T)) \quad [55]$$

Les manques minimaux inévitables QVdef de débit produit au point de restitution pour le soutien visé, dus au manque de capacité de chaque réservoir, sont toujours évalués à partir d'une série Vges calculée dans le sens chronologique par la relation 48 (mais avec un processus de détermination de Vges(Tinit-dT/2) initialisé cette fois avec Vtot au lieu d'une valeur nulle). Cette fois-ci, Vges (fig. 4.5.G(a)) désigne le volume maximal d'eau présent dans le réservoir, produit par une gestion préoccupée de la réalisation immédiate de l'objectif de soutien de débit. Les manques de débit au point de restitution, qui correspondent à un débit stocké supérieur à QST (fig. 4.5.F(c)), surviennent quand les deux conditions suivantes sont réunies : réservoir vide ( $Vges(T+dT/2)=0$ ) et débit QST(T) stocké net maximal souhaitable négatif. Au lieu de la relation 49, ils sont donnés par :

$$QVdef(T) = \max(0 ; (Vges(T+dT/2) - Vges(T-dT/2))/dT - QST(T)) \quad [56]$$

La somme des manques de débit inévitables absolus Qdef0 et des manques dus à la trop faible capacité des réservoirs donne les manques inévitables de débit Qdef1 à la station aval par rapport à l'objectif Qobj (fig. 4.5.I), toujours évalués par la relation 51.

Le maintien d'un volume d'eau inférieur à Vobj dans le réservoir entraîne des échecs supplémentaires pour le soutien de débit, qui viennent s'ajouter à certains échecs inévitables. Ces derniers varient, de la même façon que pour le laminage, selon les valeurs de Vobj dont les types B1 et B2 sont cette fois définis ainsi (fig. 4.5.G(b)) :

- Type B1 :  $Vobj < \min(Vobj0 ; Vtot)$
- Type B2 :  $Vobj = Vtot < Vobj0$

Enfin, la valeur minimale Vop du volume d'eau présent dans le réservoir (fig. 4.5.G(c)), produit par une gestion visant prioritairement l'objectif de soutien de débit immédiat et secondairement sa meilleure réalisation possible par la suite, est donnée par :

$$Vop = \min(Vobj ; Vges) \quad [57]$$

Les résultats obtenus pour un objectif de soutien de débit doivent eux aussi être analysés de façon statistique pour pouvoir être exploités comme aide à la gestion de réservoirs. A titre d'exemple, les figures 4.5.J à 4.5.L donnent les chroniques annuelles iso-fréquence des variables Qdef1, Vobj, Vop et Vdef calculées sur la base des écoulements naturels observés sur la période du 15/01/1960 au 15/12/1965, dans l'hypothèse d'un soutien à 150 m<sup>3</sup>/s du débit de la Seine à Paris Austerlitz grâce aux réservoirs Yonne, Seine, aube et Marne. Ces courbes s'interprètent suivant les mêmes principes que dans le cas d'un objectif de laminage, comme l'illustrent les exemples ci-dessous :

Pour le manque minimal inévitable de débit  $Q_{def1}$ , la figure 4.5.J nous indique par exemple que :

- Une gestion correcte des réservoirs permet d'atteindre l'objectif (débit supérieur ou égal à  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  à Paris Austerlitz) de façon garantie du 9 janvier au 26 février et du 15 mars au 21 juillet (valeur maximale de  $Q_{def1}$  nulle)
- Le 1<sup>er</sup> novembre, le débit de la Seine à Paris Austerlitz court un risque non nul de ne pas atteindre  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ , du fait des contraintes et consignes locales des réservoirs et/ou de leurs capacités limitées. Le manque minimal probable de débit pour ce jour, obtenu avec la meilleure gestion possible des réservoirs pour le laminage, atteint ou dépasse  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  une année sur deux (point B),  $28 \text{ m}^3/\text{s}$  une année sur trois (point C) et  $59 \text{ m}^3/\text{s}$  une année sur cinq (point D). Toujours inférieur ou égal à  $82 \text{ m}^3/\text{s}$  (point E), il est nul (point A) moins d'une année sur deux (et plus d'une année sur trois au sens large).

La figure 4.5.K renseigne quant à elle sur le volume minimal d'eau  $V_{obj}$  qui doit statistiquement être présent dans le réservoir Marne, pour que celui-ci puisse satisfaire ensuite du mieux possible l'objectif idéal de soutien qui lui est assigné, autrement dit pour que n'advienne pas de défaillance ultérieure de soutien qui pourrait être évitée avec un volume plus important. Les exemples suivants illustrent l'interprétation des chroniques annuelles iso-fréquence de  $V_{obj}$  :

- Le 20 janvier à 24 H, il faut que le volume d'eau présent soit supérieur ou égal aux valeurs suivantes dans le réservoir, pour que celui-ci puisse satisfaire ensuite du mieux possible son objectif de soutien de débit :  $26 \text{ hm}^3$  une année sur deux (point D) ;  $85 \text{ hm}^3$  une année sur trois (point C) ;  $138 \text{ hm}^3$  une année sur cinq (point B) ;  $189 \text{ hm}^3$  dans le pire des cas (point A). Le fait que le volume d'eau présent soit inférieur à ces valeurs entraîne inéluctablement, à la fréquence indiquée, une défaillance ultérieure de soutien de débit qui pourrait être évitée avec un volume plus important. Moins d'une année sur deux (et plus d'une année sur trois au sens large), le fait de maintenir le réservoir entièrement vide à cette date (point E) n'empêche pas celui-ci de satisfaire ensuite du mieux possible son objectif de soutien de débit. Autrement dit, ce volume d'eau nul entraîne plus d'une année sur deux (et moins de deux années sur trois au sens large), une défaillance ultérieure de soutien de débit qui pourrait être évitée avec un volume non nul.
- Le 24 mai à 24 H, le volume d'eau présent doit être supérieur ou égal aux valeurs suivantes dans le réservoir pour que celui-ci puisse satisfaire ensuite du mieux possible son objectif de soutien de débit :  $347 \text{ hm}^3$  une année sur trois (point G) ;  $269 \text{ hm}^3$  une année sur deux (point H) ;  $197 \text{ hm}^3$  deux années sur trois (point I) ;  $140 \text{ hm}^3$  quatre années sur cinq (point J) ;  $34 \text{ hm}^3$  dans tous les cas (point K). Moins d'une année sur trois (et plus d'une année sur cinq au sens large), le lac doit être plein à cette date pour permettre cette meilleure satisfaction possible de l'objectif par la suite.

## 5 MISE EN ŒUVRE DE LA METHODE

Le programme VGEST écrit en langage TurboPascal 4.0 permet d'appliquer la méthode décrite ci-dessus dans le cas d'un objectif commun de gestion (de type laminage ou soutien de débit) visé par un ensemble de réservoirs situés à l'amont, dont le nombre est compris entre un et quatre. Ce programme exploite des données et paramètres qui doivent être préalablement stockés dans certains fichiers de type texte.

### 5.1 FICHIERS DE PARAMETRES UTILISES EN ENTREE DU PROGRAMME

Les fichiers décrits ci-dessous (sauf le dernier) sont indispensables pour le fonctionnement du programme. Ils doivent à la fois vérifier un format imposé et être placés dans un répertoire nommé PARAMETR, situé directement sous le répertoire contenant le fichier VGEST.EXE. Leur nom doit respecter les règles du DOS (entre autres : maximum 8 caractères, suivis d'une extension non réservée de 3 caractères au maximum).

#### 5.1.1 Fichier concernant la station objectif

Un fichier de ce type peut être élaboré pour chaque station à laquelle on désire associer un objectif de débit minimal ou maximal à respecter, mais le programme n'en utilise qu'un seul à la fois. Il contient essentiellement la liste des réservoirs situés à l'amont, à partir desquels on souhaite contrôler les écoulements. Son format est le suivant :

- Ligne 1 : en-tête libre
- Ligne 2 [1 chaîne de 8 caractères] : identifiant de la station située à l'aval du système, ou l'objectif de gestion est localisé.
- Ligne 3 [1 entier compris entre 1 et 4] : nombre K de réservoirs situés à l'amont et utilisés pour contrôler les écoulements
- Ligne 4 à 3+K [1 chaîne de caractères de longueur inférieure ou égale à 8, compatible avec les noms de fichiers du DOS] : nom d'un des réservoirs cités ci-dessus
- Ligne 4+K à 3+2K [1 réel positif ou nul] : temps D de propagation (en heures) de l'écoulement entre le point de restitution d'un réservoir dans le cours d'eau et la station localisant l'objectif commun de gestion. Ces temps doivent apparaître dans le même ordre que les noms des réservoirs correspondants.

#### 5.1.2 Fichiers concernant les contraintes et consignes de gestion locales des réservoirs

Un fichier de ce type doit être présent pour chaque réservoir mentionné par une des lignes 4 à 3+K dans le fichier associé à la station objectif. Son nom doit obligatoirement être constitué du nom de réservoir tel qu'il apparaît dans le fichier de la station objectif, suivi de l'extension 1 (par exemple, fichier nommé "AUBE.1" pour le réservoir nommé "AUBE"). Son format est le suivant :

- ligne 1 : en-tête libre
- ligne 2 [1 chaîne de caractères de longueur inférieure ou égale à 8] : nom du réservoir. Ce nom, inséré dans ce fichier pour éviter toute confusion, peut différer du nom du fichier sans conséquence pour le programme, qui signale alors simplement cette non concordance des noms.
- lignes 3 à 7 [1 réel positif ou nul], respectivement : débitance minimale  $Q_{emin}$  du canal de prise ; débitance maximale  $Q_{emax}$  du canal de prise ; débitance minimale  $Q_{smin}$  du canal de restitution ; débitance maximale  $Q_{smax}$  du canal de restitution ; volume total  $V_{tot}$  du réservoir
- 4 groupes de lignes (concernant respectivement les débits de consigne  $Q_{Mres}$  (réservé à l'aval de la prise),  $Q_{Vres}$  (réservé à l'aval de la restitution),  $Q_{Mref}$  (référence à l'aval de la prise) et  $Q_{Vref}$  (référence à l'aval de la restitution)). Chaque groupe est composé de :
  - ligne 1 [2 entiers suivis éventuellement d'un réel] : Type (entre 0 et 2) ; Nombre N de dates pivot (entre 1 et 10) ; Borne (si Type  $\leq 0$ ). Le débit de consigne au temps t vaut alors Q défini dans les lignes suivantes si Type=0,  $\max(Q, QV(t-1) - Borne)$  si Type=1 et  $\min(Q, QV(t-1) + Borne)$  si Type = 2
  - ligne 2 [N entiers compris entre 1 et 365 et classés par ordre croissant] : dates pivot (quantièmes) de changement de valeur de Q
  - ligne 3 [N entiers compris entre 1 et  $M(\leq N)$ ], correspondant aux catégories de valeurs de Q
  - lignes 4 à 3+M [nombre entier compris entre 1 et 5, suivi d'autant de couples de réels] : nombre X de couples, suivi de X couples de valeurs  $A_i B_i$  (classés par valeurs de  $A_i$  décroissantes) interprétés comme suit : si  $Q_{Mnat} > A_1$  alors  $Q = B_1$ , sinon, si  $Q_{Mnat} > A_2$  alors  $Q = B_2$ , sinon..., si  $Q_{Mnat} > A_x$  alors  $Q = B_x$ , sinon  $Q = Q_{Mnat}$

### **5.1.3 Fichiers concernant les réseaux locaux de stations encadrant les réservoirs**

Un fichier de ce type doit être présent pour chaque réservoir mentionné par une des lignes 4 à 3+K dans le fichier associé à la station objectif. Son nom doit obligatoirement être constitué du nom de réservoir tel qu'il apparaît dans le fichier de la station objectif, suivi de l'extension 2 (par exemple, fichier nommé "AUBE.2" pour le réservoir nommé "AUBE"). Son format est le suivant :

- ligne 1 : en-tête libre
- ligne 2 [1 chaîne de caractères de longueur inférieure ou égale à 8] : nom du réservoir. Ce nom, inséré dans ce fichier pour éviter toute confusion, peut différer du nom du fichier sans conséquence pour le programme, qui signale alors simplement cette non concordance des noms.

- ligne 3 [2 entiers positifs ou nuls] : nombre  $N_a$  (entre 0 et 2) de stations situées directement à l'amont du réservoir et nombre  $N_i$  (0 ou 1) de station intermédiaire située sur un affluent rejoignant le cours d'eau entre le point de restitution du réservoir et la première station rencontrée à l'aval de celui-ci. Si  $N_a=0$ , seules les 4 premières lignes du fichier sont utilisées
- ligne 4 [1 chaîne de 8 caractères] : identifiant de la station aval du réseau local, correspondant à la première station rencontrée à l'aval du point de restitution du réservoir
- $N_a$  lignes suivantes [1 chaîne de 8 caractères] : un identifiant par ligne, désignant chacune des  $N_a$  stations amont du réseau local, correspondant aux premières stations rencontrées à l'amont des points de restitution
- $N_i$  ligne suivante [1 chaîne de 8 caractères] : identifiant désignant la station intermédiaire dans le réseau local
- $N_a$  lignes suivantes [1 réel positif ou nul] : temps DV de propagation d'écoulement (heure) entre chacun des  $N_a$  points de restitution et la station aval du réseau local
- $N_a$  lignes suivantes [1 réel positif ou nul] : temps DM de propagation d'écoulement (heure) entre chacun des  $N_a$  points de prise et la station aval du réseau local
- $N_a$  lignes suivantes [1 réel positif ou nul] : temps Dam de propagation d'écoulement (heure) entre chacune des  $N_a$  stations amont et la station aval du réseau local
- $N_i$  ligne suivante [1 réel positif ou nul] : temps Dint de propagation d'écoulement (heure) entre la station intermédiaire et la station aval du réseau local
- Ligne suivante [1 réel positif] : superficie Sav du bassin versant à la station aval du réseau local
- $N_a$  lignes suivantes [1 réel positif] : superficie SV du bassin versant à chacun des  $N_a$  points de restitution
- $N_a$  lignes suivantes [1 réel positif] : superficie SM du bassin versant à chacun des  $N_a$  points de prise
- $N_a$  lignes suivantes [1 réel positif] : superficie Sam du bassin versant à chacune des  $N_a$  stations amont du réseau local
- $N_i$  ligne suivante [1 réel positif] : superficie Sint du bassin versant à la station intermédiaire du réseau local

#### **5.1.4 Fichier décrivant les fréquences désirées pour l'analyse statistique des résultats**

Ce fichier nommé "RETOUR.TXT" est facultatif. Il permet d'imposer entre 1 et 12 temps de retour TR exprimés en année, que le programme interprète en fréquences de non dépassement  $1/TR$  et  $1-1/TR$  pour lesquelles il calcule les chroniques annuelles iso-fréquence de certaines variables.

Seules sont interprétées comme temps de retour TR les 12 premières valeurs réelles supérieures ou égales à 2 lues sur le fichier, à raison d'une valeur par ligne.

Si le fichier n'existe pas ou s'il ne contient aucune valeur interprétable comme temps de retour, le programme utilise par défaut les temps de retour suivants :

2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 50, 100, 150, 200

Pour chaque variable analysée de façon statistique, le programme classe par ordre croissant les N valeurs obtenues un jour donné sur la période de calcul. Chaque valeur de rang j est alors affectée d'une fréquence de non dépassement égale à  $(j-0.5)/N$ . Parmi les fréquences imposées par le fichier RETOUR.TXT ou par défaut, l'analyse statistique ne retient que celles qui sont comprises entre  $0.5/N$  et  $1-0.5/N$ , pour éviter les extrapolations de fonctions de répartition.

## **5.2 FICHIER DE DONNEES UTILISEES EN ENTREE DU PROGRAMME**

Indispensable pour le fonctionnement du programme, ce fichier au format imposé et dont le nom doit respecter les règles du DOS doit être placé dans un répertoire nommé DONNEES, situé directement sous le répertoire contenant le fichier VGEST.EXE. Il doit contenir des données de débit naturel pour chacune des stations mentionnées dans les fichiers de paramètres utilisés par le programme.

La première ligne du fichier doit contenir les identifiants des stations nécessaires au calcul, placés dans un ordre arbitraire. Le programme interprète cette ligne en considérant comme séparateurs tous les groupes de caractères dont le code ASCII est compris dans la liste suivante : 0..39, 42, 44, 58, 59, 123..255. Les autres caractères sont interprétés pour établir une liste de N identifiants de stations (N inférieur ou égal à 30), limités chacun en taille à 8 caractères au maximum. Cette liste doit impérativement contenir pour chacune des stations suivantes, un identifiant conforme à celui qui figure dans les fichiers de paramètres utilisés :

- La station située à l'aval du système, où est localisé l'objectif commun de gestion des réservoirs. L'identifiant de cette station figure dans la ligne 2 du fichier de paramètres concernant la station objectif.
- Pour chaque réservoir, la station aval du réseau local de stations, ainsi que la ou les stations amont et la station intermédiaire de ce réseau si le réservoir est concerné. Les identifiants de ces stations figurent dans les lignes 4 et suivantes du fichier des paramètres de réseau local associé au réservoir.

Les lignes suivantes du fichier doivent commencer par une chaîne de 8 caractères représentant la date en format AAAAMMJJ, suivie de N valeurs réelles représentant les débits de cette date pour les N stations, dans l'ordre de leurs identifiants en première ligne. Seule la date donnée en ligne 2 du fichier est interprétée par le programme, qui suppose ensuite un incrément systématique d'un jour entre chaque ligne. La lecture se poursuit automatiquement jusqu'à ce qu'une ligne non conforme ou la fin du fichier soit rencontrée. Enfin, les valeurs négatives de débit sont interprétées comme des lacunes.

### 5.3 FICHIER D'OBJECTIF UTILISE EN ENTREE DU PROGRAMME

Ce fichier dont le nom doit respecter les règles du DOS doit être placé dans un répertoire nommé OBJECTIF, situé directement sous le répertoire contenant le fichier VGEST.EXE. Pour pouvoir être utilisé par le programme, ce fichier doit contenir au moins une ligne commençant par une date [chaîne de 5 caractères au format JJ/MM], suivie d'un débit [réel positif ou nul]. Toutes les lignes du fichier respectant ce format et correspondant à des dates correctes en année non bissextile et croissantes définissent des points pivots entre lesquels le programme effectue des interpolations linéaires pour établir un hydrogramme objectif annuel.

### 5.4 EXECUTION DU PROGRAMME

Après avoir été lancé, le programme sollicite l'utilisateur pour qu'il saisisse les informations suivantes au clavier, sauf si ces dernières peuvent être lues automatiquement sur un fichier texte dédié (voir plus bas) :

- Nom du fichier de paramètres localisant l'objectif de gestion (station aval). Il s'agit du fichier décrit en 5.1.1.
- Nom du fichier de données contenant les valeurs de débits moyens journaliers naturels aux stations nécessaires (cf 5.2).
- Nom du fichier de paramètres décrivant l'hydrogramme annuel de débit objectif à la station aval (cf 5.3)
- Choix du type d'objectif à considérer, selon que l'hydrogramme objectif correspond à un débit minimal à dépasser (soutien d'étiage) ou maximal à ne pas dépasser (laminage de crue) à la station aval.
- Choix de la période sur laquelle doit être fait le calcul. Cette période doit être choisie à l'intérieur de la plus longue séquence sans lacune de données de débit, déterminée automatiquement par le programme.

Ces saisies ne sont pas demandées par le programme si les conditions suivantes sont vérifiées :

- Le répertoire contenant VGEST.EXE contient deux fichiers de type texte nommés MODE.TXT et CHOIX.TXT
- La première ligne du fichier MODE.TXT contient la valeur 1

Dans ce cas, le programme lit les informations nécessaires dans le fichier CHOIX.TXT, dont les lignes successives doivent présenter les contenus suivants :

- Nom du fichier de paramètres localisant l'objectif de gestion
- Nom du fichier de données des débits moyens journaliers naturels aux stations
- Nom du fichier de l'hydrogramme annuel de débit objectif à la station aval

- Entier caractérisant le type d'objectif à considérer : 0 si l'hydrogramme objectif correspond à un débit minimal à dépasser (soutien d'étiage) à la station aval ; autre valeur s'il correspond à un débit maximal à ne pas dépasser (laminage de crue).
- Chaîne de 10 caractères (format JJ/MM/AAAA) indiquant la date de début du calcul. Si nécessaire, le programme corrige automatiquement cette date pour l'insérer dans la plus longue période de données de débit sans lacune.
- Chaîne de 10 caractères (format JJ/MM/AAAA) indiquant la date de fin du calcul. Si nécessaire, le programme corrige automatiquement cette date pour l'insérer dans la plus longue période de données de débit sans lacune.

Enfin, la première opération effectuée par le programme VGEST consiste à détruire (s'il existe) un fichier nommé FIN.TXT situé dans le répertoire contenant VGEST.EXE. Ses deux dernières opérations consistent à créer ce fichier puis à le fermer. Le fichier FIN.TXT peut donc être utilisé pour contrôler automatiquement le déroulement du programme VGEST.

## **5.5 FICHIERS DE RESULTATS**

Les résultats du programme figurent dans des fichiers de type texte placés dans le répertoire nommé RESULTAT, situé directement sous le répertoire contenant le fichier VGEST.EXE. Chacun de ces fichiers comporte un en-tête donnant le rang du calcul (incrémenté automatiquement de 1 par chaque calcul) et sa date précise.

### **5.5.1 Fichiers décrivant les conditions du calcul**

Le fichier nommé CONDSTAT résume les options choisies par l'utilisateur et décrit les hypothèses de calcul imposées par les fichiers de paramètres concernant la station objectif, les règles de gestion des réservoirs et leurs réseaux locaux de stations. Il permet de vérifier que le calcul effectué correspond bien aux conditions et hypothèses souhaitées, et signale tout problème ou incohérence rencontré dans les fichiers de paramètres ou dans le fichier de données.

Ce fichier donne également certaines statistiques de résultats concernant la répartition idéale des débits stockés entre réservoirs, qui tient compte de leurs capacités respectives mais pas du volume d'eau présent dans chacun d'entre eux (relations de rangs inférieurs à 38). Ces statistiques, qui portent sur l'ensemble de la période couverte par le fichier de données, décrivent en particulier la position des débits stockés nets, pris, restitués et produits par chaque réservoir, par rapport aux limites imposées par les différentes contraintes et consignes.

### **5.5.2 Fichiers de chroniques journalières de résultats**

#### ***5.5.2.1 Débits naturels à la station aval et aux points de prise et de restitution des réservoirs***

Le fichier nommé QOBS-P-R.TXT donne les valeurs moyennes journalières de débit  $Q_{nat}$  pour la station située à l'aval du système et  $Q_{Mnat}$  et  $Q_{Vnat}$  pour chaque réservoir considéré dans le calcul. La période couverte correspond à celle du fichier de données utilisé.

### ***5.5.2.2 Débits stockés idéaux dans chaque réservoir***

Le fichier nommé QSTOCK-I.TXT, qui couvre la même période que le précédent, donne pour chaque réservoir les limites minimales QSTmin et maximales QSTmax de débit stocké imposées par les contraintes et consignes locales, ainsi que le débit stocké QST souhaitable pour satisfaire au mieux l'objectif aval, dans le respect de ces limites et après répartition entre tous les réservoirs. Il donne également les valeurs de certains codes décrivant la position de ce débit par rapport aux limites imposées localement, ainsi que celle des débits idéaux associés prélevés  $Q_e$ , restitué  $Q_s$  et produit  $Q_V$ .

### ***5.5.2.3 Limites de débit imposées par les contraintes et consignes locale et débit idéal produit pour chaque réservoir, et défaillance inévitable absolue à la station aval***

Le fichier nommé Q-IDEAL.TXT, qui couvre la même période que le précédent, donne le débit naturel  $Q_{nat}$  et le débit objectif  $Q_{obj}$  à la station située à l'aval du système. Il donne en outre, pour chaque réservoir, les débits naturels  $Q_{Mnat}$  et  $Q_{Vnat}$ , réservés  $Q_{Mres}$  et  $Q_{Vres}$  et de référence  $Q_{Mref}$  et  $Q_{Vref}$  aux points de prise et de restitution, ainsi que le débit idéal produit  $Q_V$  et les codes déjà édités dans le fichier précédent. Il donne enfin les valeurs du débit stocké  $Q_{ST0}$  à répartir entre réservoirs et celles de la défaillance absolue inévitable de débit  $Q_{def0}$  à la station aval.

### ***5.5.2.4 Volumes d'eau dans les réservoirs.***

Le fichier nommé VOLUMES.TXT couvre la période demandée pour le calcul. Il donne pour chaque réservoir les valeurs des volumes suivants :  $V_{def}$ ,  $V_{obj}$ ,  $V_{obj0}$ ,  $V_{ges}$  et  $V_{op}$ .

### ***5.5.2.5 Défaillances de débit à la station aval***

Le fichier ECHECS-Q.TXT couvre la même période que le précédent. Il donne les valeurs des défaillances de débit à la station aval, par rapport à l'objectif :  $Q_{def0}$  (inévitables absolus, dû aux contraintes et consignes locales des ouvrages) ;  $Q_{def}$  (inévitables, dû aux raisons précédentes et/ou au manque de capacité des ouvrages).

## **5.5.3 Fichiers de statistiques de résultats**

Pour un nombre  $K$  de réservoirs, le programme produit les  $3K+2$  fichiers suivants :

- **VOBJn** : ce fichier, produit pour chaque réservoir de rang  $n$ , concerne la limite  $V_{obj}$  de volume d'eau qu'il faut respecter dans le réservoir pour que celui-ci soit en mesure de satisfaire du mieux possible l'objectif aval commun par la suite. Ce sont les statistiques de  $V_{obj}$  qui peuvent être utilisées comme aide à la gestion en temps réel en avenir inconnu.
- **VOPn** : ce fichier est également produit pour chaque réservoir de rang  $n$ . Il concerne la limite  $V_{OP}$  de volume d'eau dans le réservoir produite par une gestion visant prioritairement la meilleure satisfaction possible de l'objectif commun dans l'immédiat, et secondairement sa meilleure satisfaction possible par la suite.
- **MANQUEn** : ce fichier est également produit pour chaque réservoir de rang  $n$ . Il concerne le manque  $V_{def}$  de capacité du réservoir, responsable de défaillances de gestion par rapport à l'objectif commun à la station aval, qui s'ajoutent aux défaillances inévitables absolues.

- ECHEC0 : ce fichier concerne les défaillances inévitables absolues  $Q_{def0}$  du débit obtenu à la station aval, par rapport à l'objectif commun de gestion. Ces défaillances sont dues aux contraintes et consignes locales des ouvrages, indépendamment de la capacité des réservoirs.
- ECHEC1 : ce fichier concerne les défaillances inévitables  $Q_{def1}$  du débit obtenu à la station aval, par rapport à l'objectif commun de gestion. Ces défaillances sont dues aux contraintes et consignes locales des ouvrages, ainsi qu'à leur manque de capacité.

Chacun des fichiers présente trois tableaux de valeurs pour la variable concernée, correspondant de gauche à droite aux classements suivants :

- par ordre chronologique (une colonne par année, une ligne par quantième)
- par ordre croissant (une colonne par rang, une ligne par quantième)
- par fréquence décroissante de non dépassement (une fréquence par colonne, un quantième par ligne). Ce dernier tableau contient également une colonne de valeurs minimales et une colonne de valeurs maximales

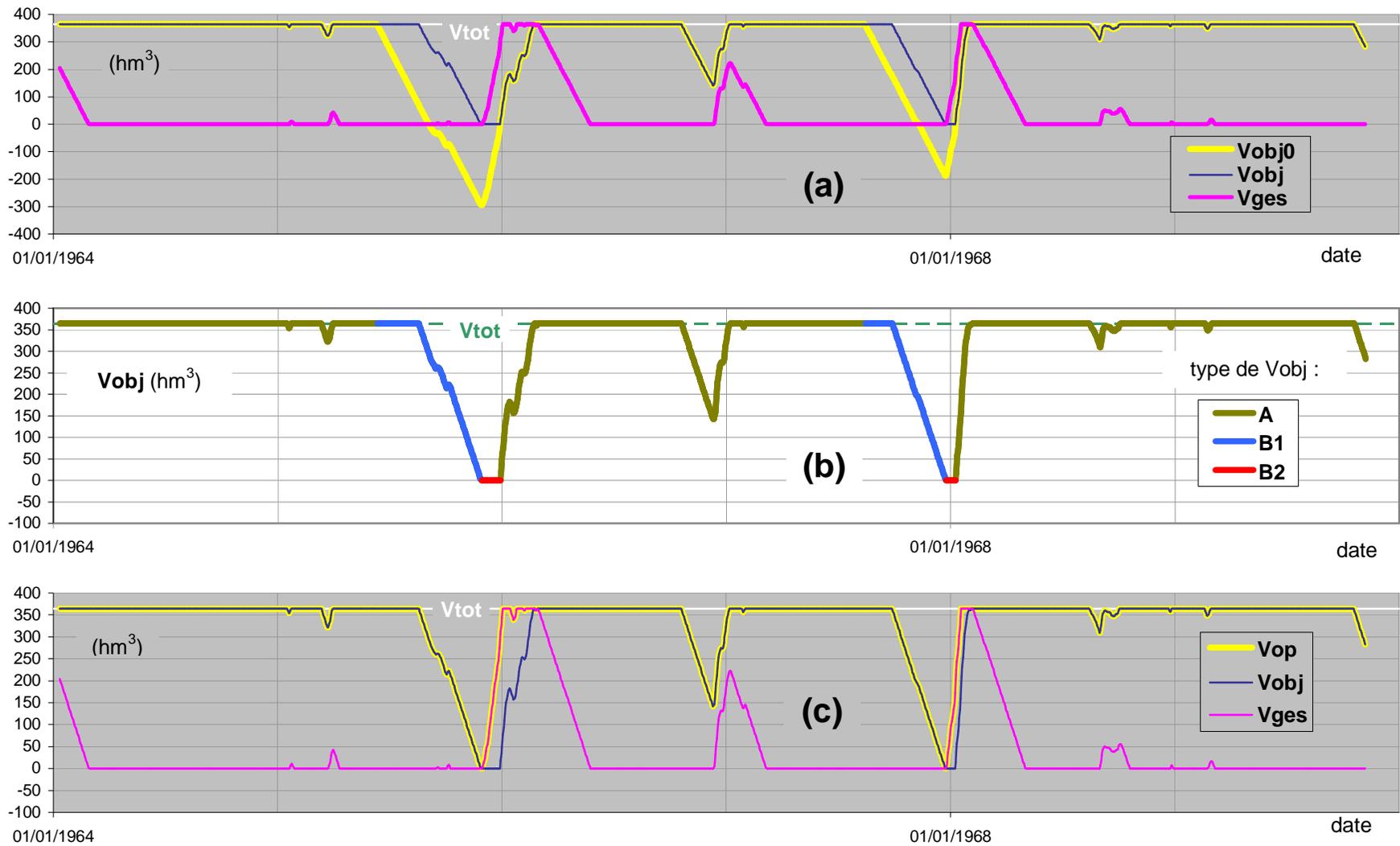


Figure 4.5.A : exemple de résultats (objectif : laminage à  $800 m^3/s$  du débit de la Seine à Paris du 15/01/1964 au 10/11/1969, climat observé) : chronique de volume d'eau présent dans le réservoir Marne ( $Vobj$  : maximum souhaitable pour objectif futur ;  $Vobj_0$  maximum souhaitable idéal pour objectif futur ;  $Vges$  : minimum réalisable pour objectif immédiat ;  $Vop$  : maximum opérationnel pour objectif immédiat prioritaire et objectif futur secondaire)

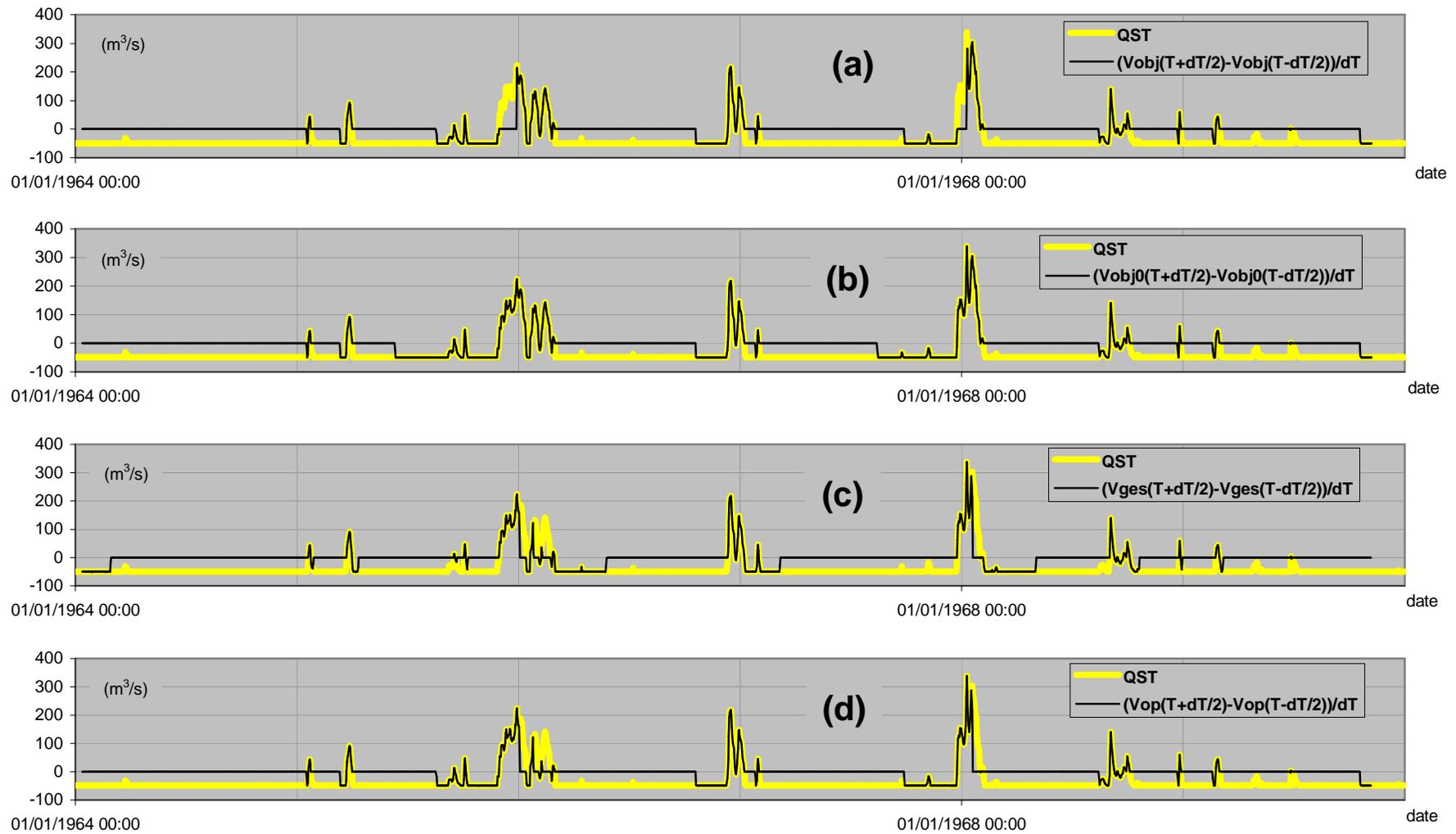


Figure 4.5.B : exemple de résultats (objectif : laminage à  $800 \text{ m}^3/\text{s}$  de la Seine à Paris du 15/01/1964 au 10/11/1969, climat observé) : comparaison du débit stocké dans le réservoir Marne pour les différents volumes calculés ( $V_{obj}$  (a),  $V_{obj0}$  (b),  $V_{ges}$  (c),  $V_{op}$  (d)), avec le débit stocké minimal idéal QST

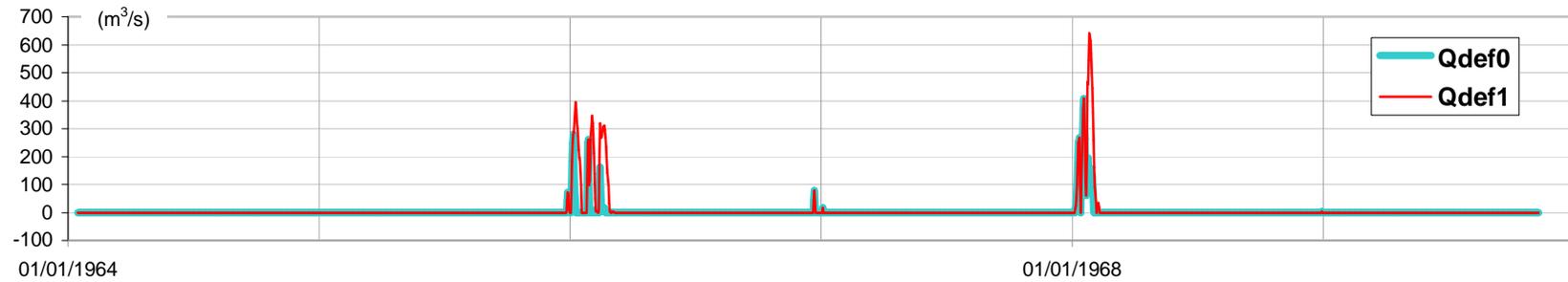


Figure 4.5.C : exemple de résultats (objectif : laminage à 800 m<sup>3</sup>/s de la Seine à Paris du 15/01/1964 au 10/11/1969, climat observé) : chroniques des excédents de débit obtenus à Paris par rapport au seuil de laminage visé (Qdef0 : minimum inévitable absolu (dû aux contraintes et consignes locales de gestion des réservoirs); Qdef1 : minimum inévitable compte tenu des contraintes et consignes de gestion des réservoirs et de leurs manques de capacité)

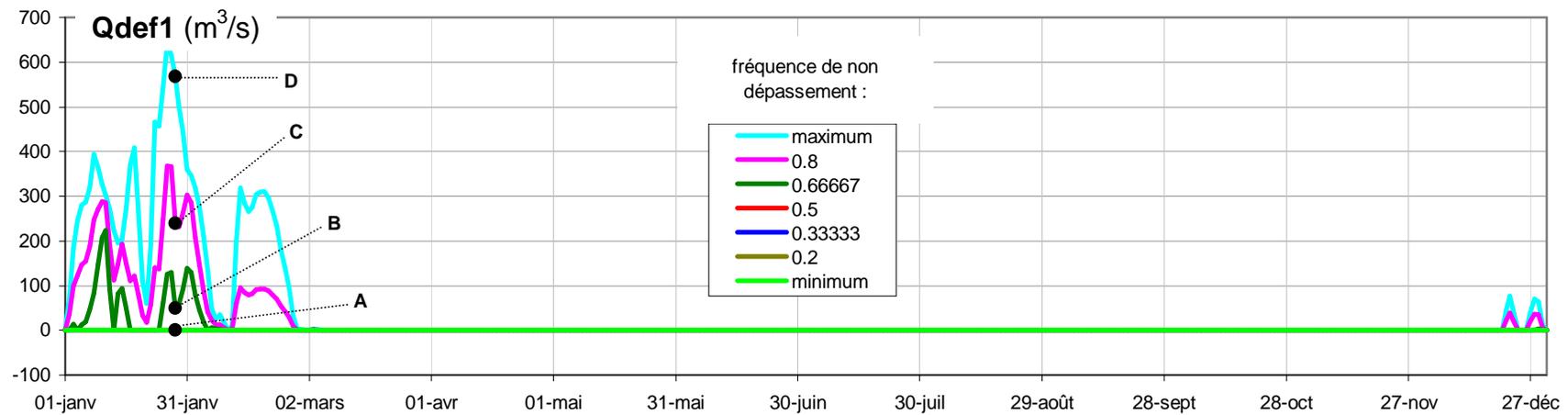


Figure 4.5.D : exemple de résultats (objectif : laminage à 800 m<sup>3</sup>/s de la Seine à Paris du 15/01/1964 au 10/11/1969, climat observé) : chroniques annuelles iso-fréquence de l'excédent minimal inévitable de débit Qdef1 obtenu à Paris par rapport au seuil de laminage visé

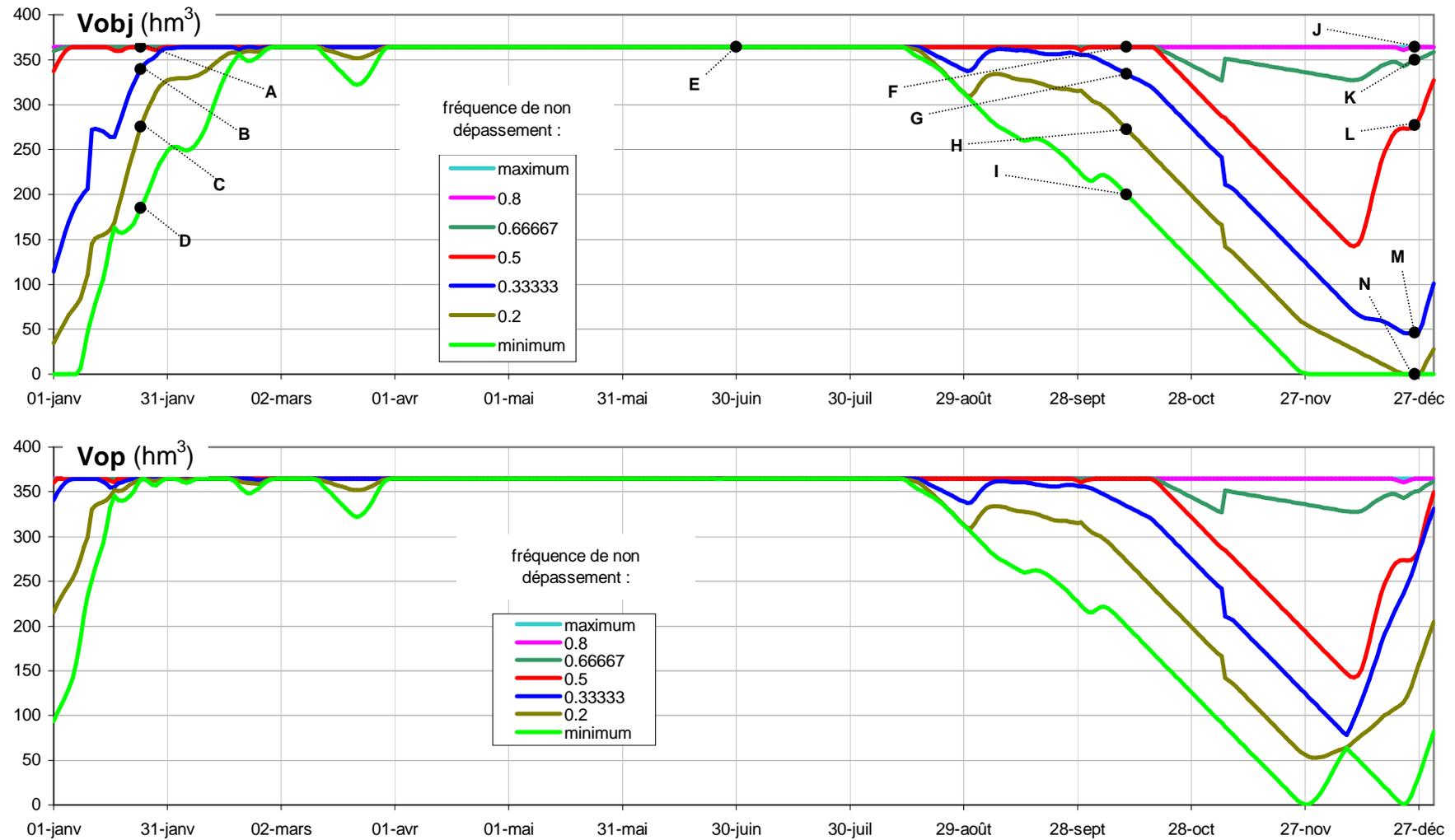


Figure 4.5.E : exemple de résultats (objectif : laminage à  $800 \text{ m}^3/\text{s}$  de la Seine à Paris du 15/01/1964 au 10/11/1969, climat observé) : chroniques annuelles iso-fréquence des volumes maximaux dans le réservoir Marne (Vobj : valeur à ne pas dépasser pour permettre la meilleure satisfaction possible de l'objectif par la suite ; Vop : valeur maximale produite par une gestion visant la meilleure satisfaction possible de l'objectif, prioritairement dans l'immédiat et secondairement dans le futur)

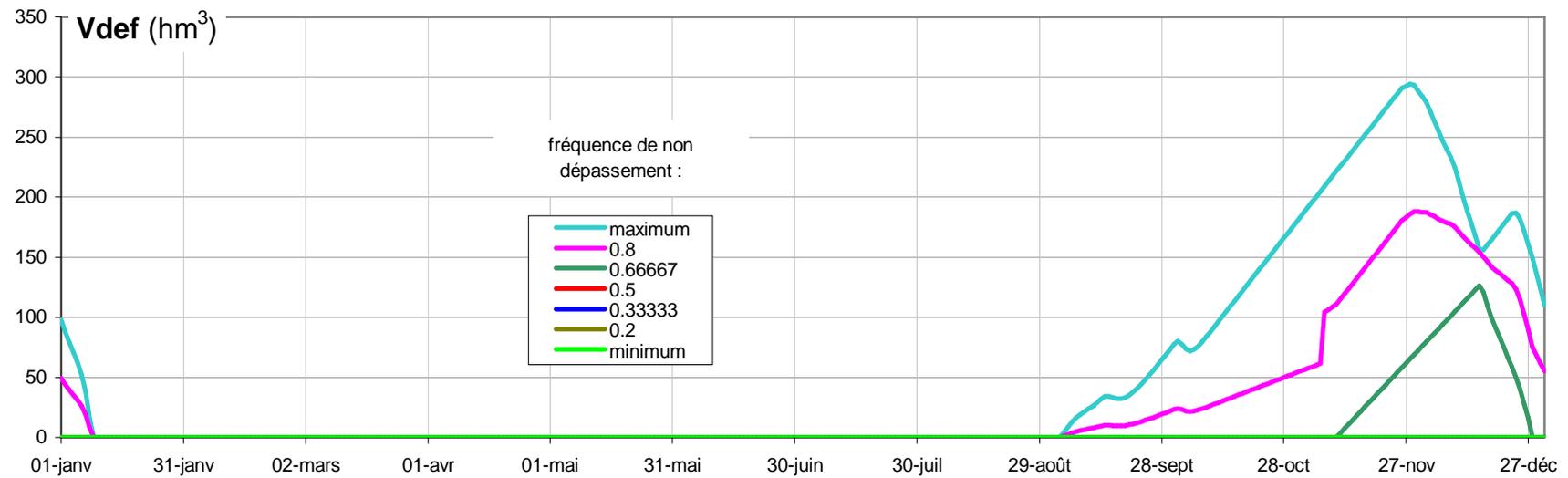


Figure 4.5.F : exemple de résultats (objectif : soutien du débit de la Seine à Paris à  $150 m^3/s$  du 15/01/1960 au 15/12/1965, climat observé) : chroniques annuelles iso-fréquence du volume  $V_{def}$  manquant au réservoir Marne pour lui permettre de satisfaire entièrement l'objectif idéal de laminage de débit qui lui est assigné, en évitant les situations d'échec suivantes : impossibilité de stocker le débit nécessaire, pour cause de réservoir plein.

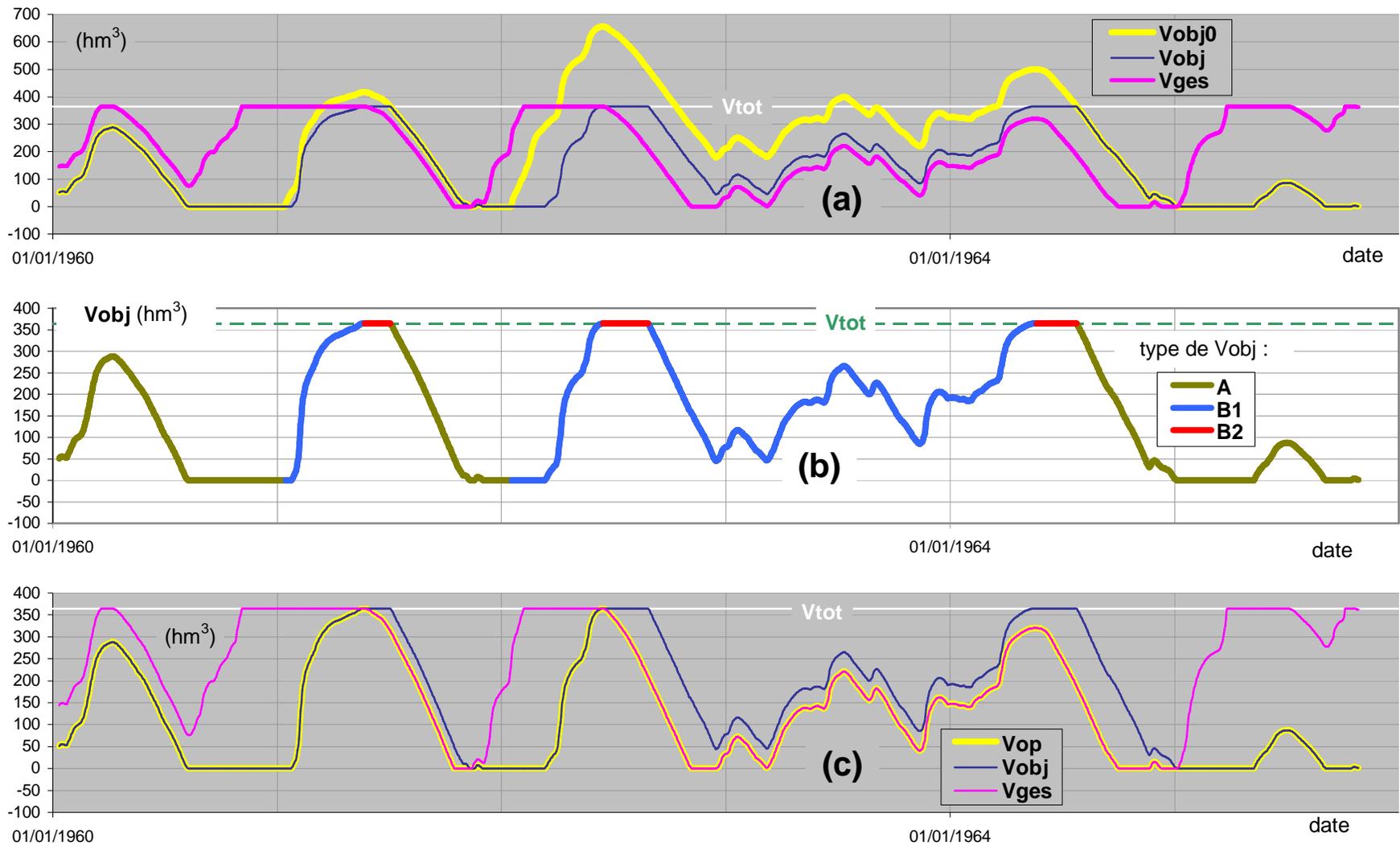


Figure 4.5.G : exemple de résultats (objectif : soutien du débit de la Seine à Paris à  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  du 15/01/1960 au 15/12/1965, climat observé) : chronique de volume d'eau présent dans le réservoir Marne ( $V_{obj}$  : minimum souhaitable pour objectif futur ;  $V_{obj0}$  minimum souhaitable idéal pour objectif futur ;  $V_{ges}$  : maximum réalisable pour objectif immédiat ;  $V_{op}$  : minimum opérationnel pour objectif immédiat prioritaire et objectif futur secondaire)

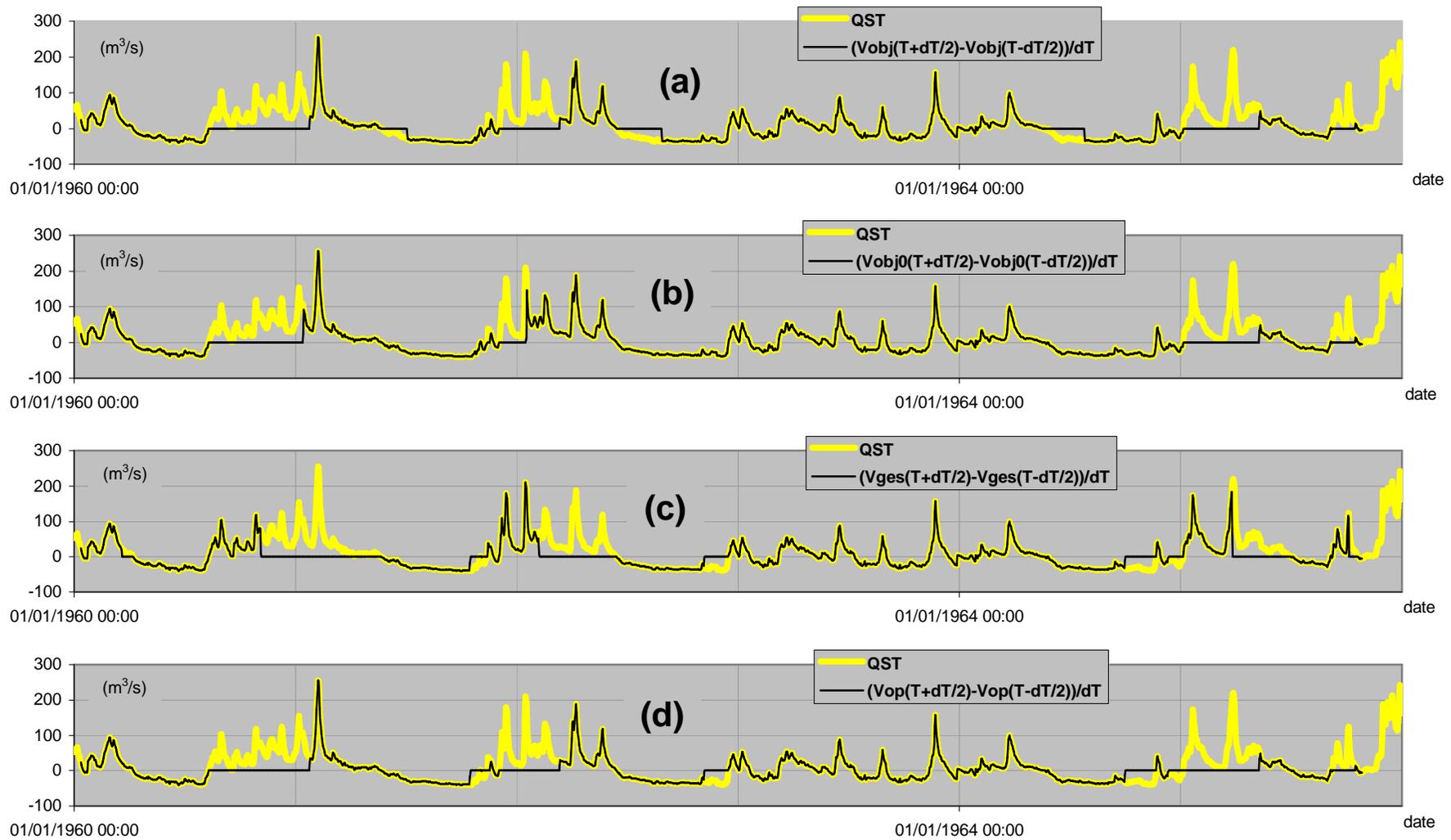


Figure 4.5.H : exemple de résultats (objectif : soutien du débit de la Seine à Paris à  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  du 15/01/1960 au 15/12/1965, climat observé) : comparaison du débit stocké dans le réservoir Marne pour les différents volumes calculés ( $V_{obj}$  (a),  $V_{obj0}$  (b),  $V_{ges}$  (c),  $V_{op}$  (d)), avec le débit stocké maximal idéal QST

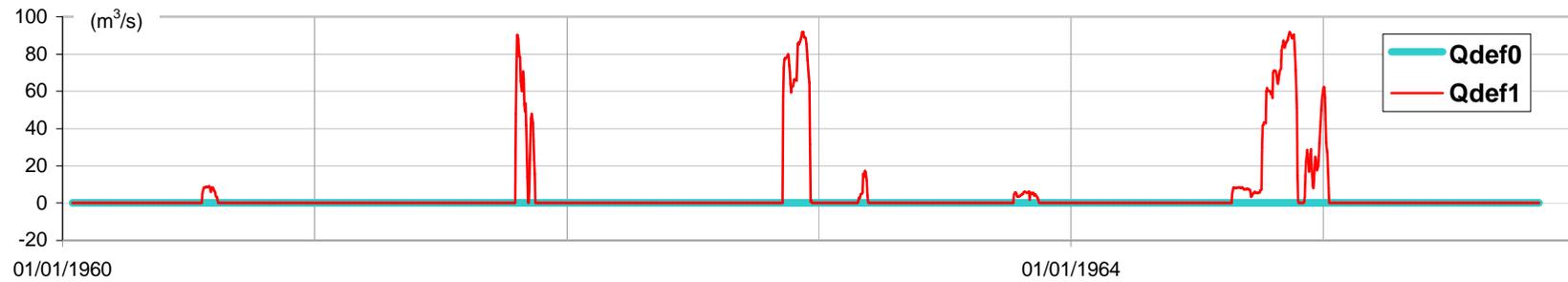


Figure 4.5.I : exemple de résultats (objectif : soutien du débit de la Seine à Paris à 150 m³/s du 15/01/1960 au 15/12/1965, climat observé) : chroniques des manques de débit obtenus à Paris par rapport débit minimal souhaité (Qdef0 : minimum inévitable absolu (dû aux contraintes et consignes locales de gestion des réservoirs); Qdef1 : minimum inévitable, compte tenu des contraintes et consignes de gestion des réservoirs et de leurs manques de capacité)

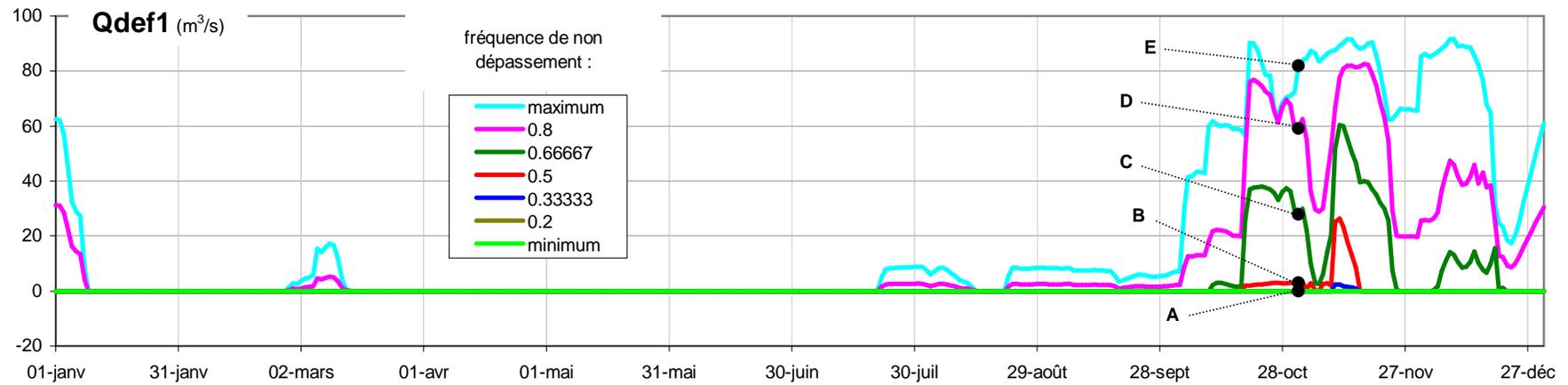


Figure 4.5.J : exemple de résultats (objectif : soutien du débit de la Seine à Paris à 150 m³/s du 15/01/1960 au 15/12/1965, climat observé) : chroniques annuelles iso-fréquence du manque minimal inévitable de débit Qdef1 obtenu à Paris par rapport au débit souhaité

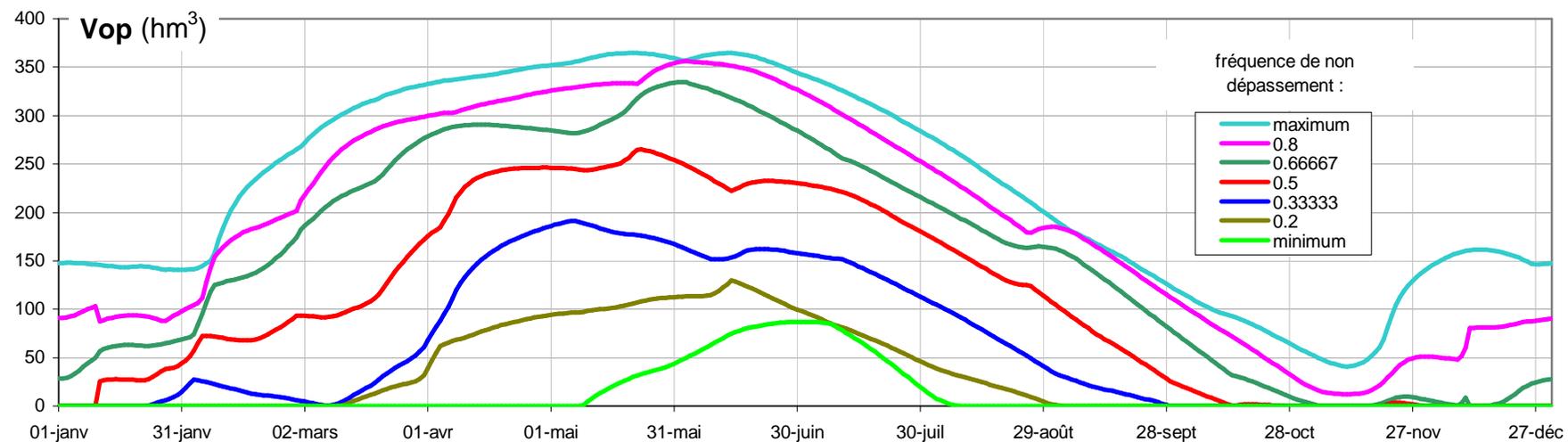
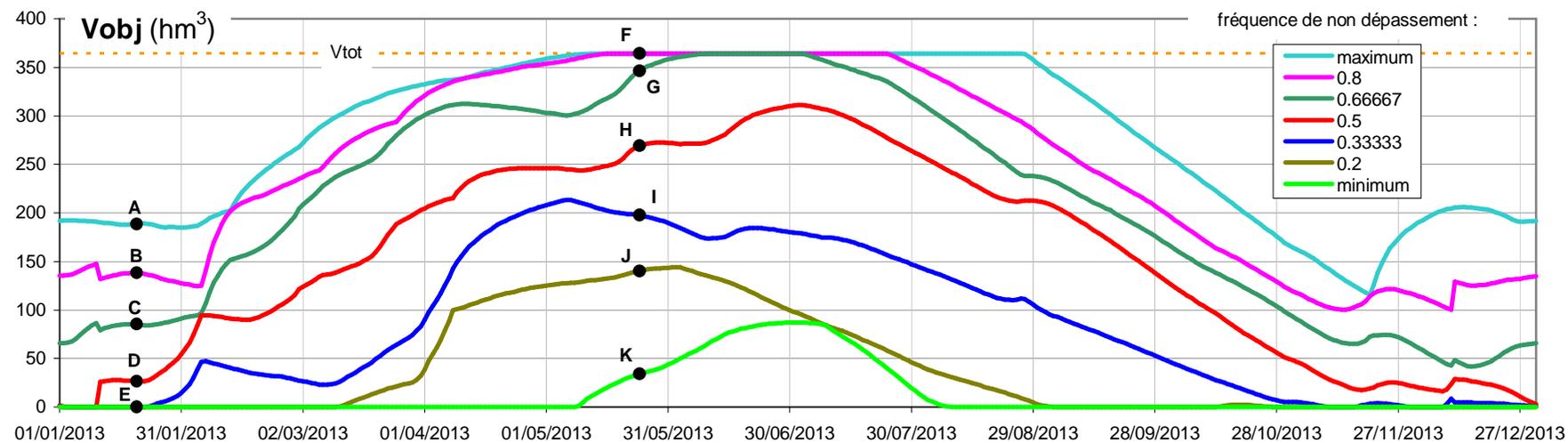


Figure 4.5.K : exemple de résultats (objectif : soutien du débit de la Seine à Paris à 150 m<sup>3</sup>/s du 15/01/1960 au 15/12/1965, climat observé) : chroniques annuelles iso-fréquence du volume minimal d'eau dans le réservoir Marne (Vobj : valeur à atteindre ou dépasser pour permettre la meilleure satisfaction possible de l'objectif par la suite ; Vop : valeur minimale produite par une gestion visant la meilleure satisfaction possible de l'objectif, prioritairement dans l'immédiat et secondairement dans le futur)

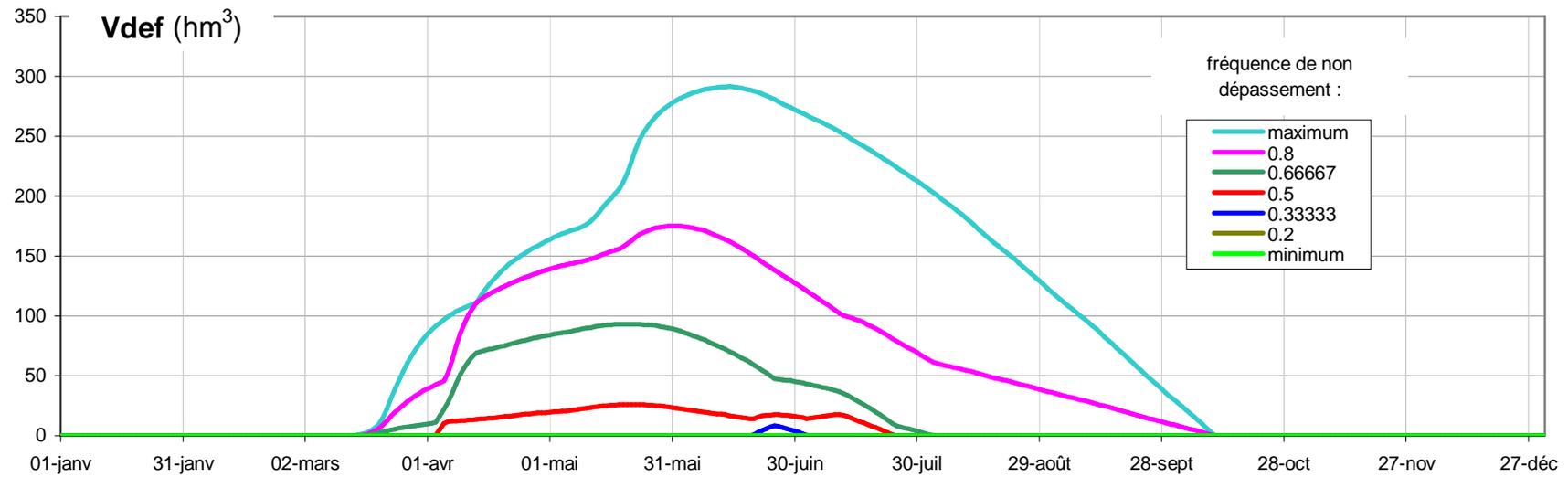


Figure 4.5.L : exemple de résultats (objectif : soutien du débit de la Seine à Paris à  $150 m^3/s$  du 15/01/1960 au 15/12/1965, climat observé) : chroniques annuelles iso-fréquence du volume  $V_{def}$  manquant au réservoir Mame pour lui permettre de satisfaire entièrement l'objectif idéal de soutien de débit qui lui est assigné, en évitant les situations d'échec suivantes : impossibilité de déstocker le débit nécessaire, pour cause de réservoir vide.

## ANNEXE : DONNEES COMPLEMENTAIRES UTILISEES

### Codes d'identification des stations utilisées et débits naturalisés disponibles

Yonne à Chaumard	:	CHAUM_07
Seine à Méry sur Seine	:	MERY-_22
Seine à Bar sur Seine	:	BAR-S_06
Aube à Arcis sur Aube	:	ARCIS_24
Aube à Trannes	:	TRANN_01
Voire à Lassicourt	:	LASSI_20
Marne à Châlons sur Marne	:	CHALO_21
Marne à Saint Dizier	:	STDIZ_04
Blaise à Louvemont	:	LOUVE_19
Saulx à Vitry	:	VITRY_25
Seine à Paris Austerlitz	:	PARIS_05

Pour chacune de ces stations, on dispose des débits moyens journaliers naturalisés pour le régime observé sur la période du 01/08/1958 au 31/12/2009

### Consignes de gestion actuelles

-Débit réservé dans le cours d'eau juste à l'aval de la prise (QMres)

- Yonne :  $QMres1=0$
- Seine : en octobre, novembre et de janvier à mars,  $QMres2 = 3 \text{ m}^3/\text{s}$  ; en décembre et d'avril à septembre,  $QMres2 = 3 \text{ m}^3/\text{s}$  si  $QM2>10$ ,  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  si  $10>QM2>8$ ,  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  si  $8>QM2>6$  et  $QM2$  si  $QM2<6$
- Aube : de novembre à mars,  $QMres3 = 2 \text{ m}^3/\text{s}$  ; d'avril à octobre :  $QMres3 = 2 \text{ m}^3/\text{s}$  si  $QM3>8$ ,  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  si  $8>QM3>6$ ,  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  si  $6>QM3>4$  et  $QM3$  si  $QM3<4$
- Marne : d'avril à octobre,  $QMres4 = 11 \text{ m}^3/\text{s}$  ; de novembre à mars,  $QMres4 = 7 \text{ m}^3/\text{s}$

-débit de référence dans le cours d'eau juste à l'aval de la prise (QMref) :

- Yonne :  $QMref1 = 0$

- Seine : de novembre à mars,  $QMref2 = 120 \text{ m}^3/\text{s}$  ; d'avril à juin,  $QMref2 = 90 \text{ m}^3/\text{s}$  ; de juillet à octobre,  $QMref2 = 40 \text{ m}^3/\text{s}$
- Aube :  $QMref3 = 130 \text{ m}^3/\text{s}$
- Marne : de novembre à mars,  $QMref4 = 160 \text{ m}^3/\text{s}$  ; en avril,  $QMref4 = 140 \text{ m}^3/\text{s}$  ; en mai et juin,  $QMref4 = 120 \text{ m}^3/\text{s}$  ; de juillet à septembre,  $QMref4 = 90 \text{ m}^3/\text{s}$  ; en octobre,  $QMref4 = 120 \text{ m}^3/\text{s}$

-débit réservé dans le cours d'eau juste à l'aval de la restitution ( $QVres$ ) :

- Yonne :  $QVres1(t) = \max(0.6 ; QV1(t-1)-2)$ , avec t représentant le temps exprimé en jour
- Seine :  $QVres2 = QMres2$  (débit réservé juste à l'aval de la prise)
- Aube :  $QVres3 = QMres3$  (débit réservé juste à l'aval de la prise)
- Marne :  $QVres4 = QMres4$  (débit réservé juste à l'aval de la prise)

-débit de référence dans le cours d'eau juste à l'aval de la restitution ( $QVref$ ) :

- Yonne :  $QVref1(t) = \min(QVref1o, QV1(t-1)+2)$ , avec  $QVref1o = 12 \text{ m}^3/\text{s}$  d'avril à octobre et  $14 \text{ m}^3/\text{s}$  de novembre à mars, et avec t représentant le temps exprimé en jour
- Seine :  $QVref2 = QMref2$  (débit de référence juste à l'aval de la prise)
- Aube :  $QVref3 = QMref3$  (débit de référence juste à l'aval de la prise)
- Marne : de novembre à juin,  $QVref4 = 140 \text{ m}^3/\text{s}$  ; de juillet à septembre,  $QVref4 = 75 \text{ m}^3/\text{s}$  ; du 1<sup>er</sup> au 15 octobre,  $QVref4 = 100 \text{ m}^3/\text{s}$  ; du 16 au 31 octobre,  $QVref4 = 120 \text{ m}^3/\text{s}$

### **Paramètres du système (contraintes de gestion)**

-débitance minimale du canal de prise ( $Qemin$ )

- Yonne, Seine, Aube, Marne :  $Qemin1 = Qemin2 = Qemin3 = Qemin4 = 0$

-débitance maximale du canal de prise ( $Qemax$ )

- Yonne :  $Qemax1 = 1E20$
- Seine :  $Qemax2 = 200 \text{ m}^3/\text{s}$
- Aube :  $Qemax3 = 135 \text{ m}^3/\text{s}$
- Marne :  $Qemax4 = 408 \text{ m}^3/\text{s}$

-débitance minimale du canal de restitution ( $Qsmin$ ) :

- Yonne, Aube, Marne :  $Q_{\text{min}1} = Q_{\text{min}3} = Q_{\text{min}4} = 0$
- Seine :  $Q_{\text{min}2} = 0.8 \text{ m}^3/\text{s}$  (débit minimal destiné au canal de Baires. Cet objectif de gestion est assimilé ici à une contrainte de gestion)

-débitance maximale du canal de restitution ( $Q_{\text{Smax}}$ )

- Yonne :  $Q_{\text{Smax}1} = 16 \text{ m}^3/\text{s}$
- Seine :  $Q_{\text{Smax}2} = 35 \text{ m}^3/\text{s}$
- Aube :  $Q_{\text{Smax}3} = 35 \text{ m}^3/\text{s}$
- Marne :  $Q_{\text{Smax}4} = 50 \text{ m}^3/\text{s}$

-volumes des réservoirs ( $V$ , exprimé en millions de  $\text{m}^3$ )

- Yonne :  $V1 = 82.87$  ; Seine :  $V2 = 219.5$  ; Aube :  $V3 = 183.5$  ; Marne :  $V4 = 364.5$

-temps moyen de propagation de l'écoulement entre les stations hydrométriques et Paris Austerlitz

- Yonne à Chaumard : 71 H
- Seine à Méry sur Seine : 92 H
- Seine à Bar sur Seine : 157 H
- Aube à Arcis sur Aube : 120 H
- Aube à Trannes : 169 H
- Voire à Lassicourt : 137 H
- Marne à Châlons sur Marne : 76 H
- Marne à Saint Dizier : 117 H
- Blaise à Louvemont : 121 H
- Saulx à Vitry : 118 H

-temps moyen  $D$  de propagation de l'écoulement entre chaque restitution et Paris Austerlitz

- Yonne :  $T1 = 71 \text{ H}$
- Seine :  $T2 = 126 \text{ H}$
- Aube :  $T3 = 137 \text{ H}$
- Marne :  $T4 = 107 \text{ H}$