

**CALCUL DES LIMITES DE VOLUME D'EAU À  
RESPECTER DANS DES RÉSERVOIRS IMPLANTÉS  
EN PARALLÈLE SUR UN RÉSEAU  
HYDROGRAPHIQUE, POUR PERMETTRE LA  
MEILLEURE SATISFACTION FUTURE POSSIBLE  
D'UN OBJECTIF COMMUN DE GESTION À L'AVAL  
(SOUTIEN D'ÉTIAGE OU LAMINAGE DE CRUE)**

**LOGICIEL VGEST**

**APPLICATION AU CAS DU BASSIN DE LA SEINE  
(AMÉLIORATION ET EXTENSION DE LA MÉTHODE  
PRÉCÉDEMMENT DÉVELOPPÉE DANS LE CADRE DU  
PROGRAMME CLIMAWARE)**

Jean-Claude Bader (IRD/G-EAU)

David Dorchies (IRSTEA/G-EAU)

Le 01/12/2016

# Table des matières

1	Objectif et résumé .....	6
2	Notations.....	9
3	Donnees .....	16
4	Méthode.....	17
4.1	Reconstitution des débits naturels dans les cours d'eau au droit des prises et des restitutions .....	17
4.2	Limites imposées par les contraintes physiques et consignes de gestion à la prise et à la restitution sur le débit stocké net dans un réservoir. ....	19
4.2.1	Contraintes physiques et consignes de gestion à la prise .....	19
4.2.2	Contraintes physiques et consignes de gestion à la restitution .....	20
4.2.3	Conséquences des contraintes physiques et règles de gestion à la prise et à la restitution sur le débit stocké net .....	20
4.3	Limites imposées par la capacité et l'état de remplissage d'un réservoir sur le débit stocké net dans celui-ci.....	21
4.4	Repartition du stockage net dans plusieurs réservoirs pour obtenir, dans le cours d'eau à une station située à leur aval commun, un débit le plus proche possible d'une valeur prédéfinie .....	23
4.4.1	Modalités de répartition théorique de l'objectif de débit stocké entre les réservoirs, quand les contraintes et consignes locales des ouvrages laissent la possibilité d'obtenir exactement le débit visé à l'aval.....	24
4.4.1.1	Mode 1 : répartition figée .....	25
4.4.1.2	Mode 2 : répartition faite en fonction des volumes utilisables présents et des durées potentielles minimales d'obtention de volumes utilisables maximaux dans les différents réservoirs .....	26
4.4.1.3	Mode 3 : répartition visant à équilibrer les taux de remplissage des réservoirs .....	30
4.4.1.4	Mode 4 : répartition visant à équilibrer entre les réservoirs, soit les durées potentielles minimales de reconstitution du volume utilisable maximal, soit les durées potentielles minimales d'épuisement du volume utilisable, calculées pour des écoulements naturels conformes aux modules dans les cours d'eau .....	31
4.4.1.5	Mode 5 : répartition visant à équilibrer entre les réservoirs, soit les durées potentielles minimales de reconstitution du volume utilisable maximal, soit les durées	

potentielles minimales d'épuisement du volume utilisable, pour des écoulements naturels conformes à des hydrogrammes iso-fréquence dans les cours d'eau .....	35
4.5 Débit idéal pris, restitué et produit dans le cours d'eau à l'aval immédiat de la restitution aux différents réservoirs pour obtenir, dans le cours d'eau à une station située à leur aval commun, un débit le plus proche possible d'un objectif prédéfini .....	36
4.6 Défaillances de satisfaction d'un objectif de gestion défini par un seuil minimal ou maximal de débit à respecter dans le cours d'eau à une station située en aval des réservoirs .....	37
4.7 Evolution des volumes d'eau présents dans les réservoirs, liée à la meilleure satisfaction possible d'un objectif de gestion défini à l'aval (seuil de débit à dépasser ou ne pas dépasser dans le cours d'eau) .....	40
4.7.1 Simulation en chronologie inverse : calcul des valeurs limites $Vobj$ de volume d'eau à respecter dans les réservoirs, condition minimale nécessaire pour permettre la meilleure satisfaction future possible de l'objectif aval .....	40
4.7.2 Simulation en sens chronologique : calcul des valeurs $Vges$ du volume d'eau présent, résultant d'une gestion opérationnelle visant, face à un avenir inconnu, d'abord à satisfaire l'objectif aval dans l'immédiat et ensuite à préserver au mieux les conditions optimales pour sa satisfaction future .....	41
4.7.3 Valeurs $Vop$ du volume d'eau présent dans les réservoir, produites par une gestion opérationnelle théorique visant, face à un avenir connu, d'abord à satisfaire l'objectif aval dans l'immédiat, ensuite à préserver au mieux les conditions minimales nécessaires pour sa satisfaction future et enfin à pénaliser le moins possible d'éventuels objectifs concurrentiels .....	42
4.8 Evaluation du manque de capacité globale des réservoirs entraînant des défaillances de satisfaction de l'objectif aval en plus des défaillances inevitables absolues	46
4.8.1 Simulation en chronologie inverse : calcul du manque global de volume d'eau ou de vide disponible, responsable de défaillances $QXdef2$ futures .....	46
4.8.2 Simulation en chronologie normale : calcul du manque global de volume d'eau ou de vide disponible, responsable des défaillances $QXdef2$ passées .....	47
4.9 Intérêt des résultats obtenus pour la gestion opérationnelle des réservoirs : chroniques annuelles iso-fréquence .....	47
5 Implémentation de la méthode : logiciel VGEST .....	53
5.1 Fichiers de paramètres utilisés en entrée du programme .....	53
5.1.1 Fichier concernant la station objectif .....	53
5.1.2 Fichiers concernant les contraintes physiques et consignes de gestion aux prises et restitutions des réservoirs .....	53
5.1.3 Fichiers concernant les réseaux locaux de stations encadrant les réservoirs	55

5.1.4	Fichier "RETOUR.TXT" décrivant le mode de calcul des fréquences observées et les valeurs de fréquence désirées pour l'analyse statistique des résultats	56
5.1.5	Fichier "REGLAGE.TXT" décrivant les différences entre valeurs fictives ( $VR_{tot}$ ) et réelles ( $V_{tot}$ ) de volume total exploitable pour chaque réservoir	57
5.1.6	Fichier "PUISS.TXT" conditionnant le type de moyenne calculée pour les défaillances de débit $QX_{def0}$ , $QX_{def1}$ et $QX_{def2}$	58
5.1.7	Fichier "OUITRI.TXT" conditionnant l'édition de séries classées des défaillances obtenues	58
5.1.8	Fichier "FREQNDEP" conditionnant les hydrogrammes iso-fréquences des cours d'eau utilisés pour le mode 5 de répartition des tâches entre réservoirs	59
5.2	Fichier de données utilisées en entrée du programme	59
5.3	Fichier d'objectif utilisé en entrée du programme	60
5.4	Exécution du programme VGEST	60
5.5	Fichiers de résultats	62
5.5.1	Fichiers décrivant les conditions du calcul et donnant certains résultats synthétiques	62
5.5.1.1	Fichier "CondStat" décrivant les paramètres du calcul et donnant certaines statistiques de résultats	62
5.5.1.2	Fichier "BILAN" décrivant la sollicitation des réservoirs et les défaillances de satisfaction de l'objectif aval	63
5.5.1.3	Fichier "QMNquant"	64
5.5.2	Fichiers de chroniques journalières de résultats	64
5.5.2.1	Fichier "Qobs-P-R.txt" : débits naturels simultanés à la station aval et aux points de prise et de restitution des réservoirs	64
5.5.2.2	Fichier "QSynchro.txt" : débits naturels synchronisés à la station aval et aux points de prise et de restitution des réservoirs	64
5.5.2.3	Fichier "PaChrono.txt" : résultats détaillés du calcul en chronologie inverse	65
5.5.2.4	Fichier "Chrono.txt" : résultats détaillés du calcul en sens chronologique	66
5.5.2.5	Fichiers "EchecQ-A.txt" et "EchecQ-B.txt" des défaillances de satisfaction de l'objectif aval	68
5.5.2.6	Fichier "Volumes.txt" des volumes d'eau dans les réservoirs	68
5.5.3	Fichiers de statistiques de résultats	68

5.6	Perspectives de développements complémentaires .....	69
5.6.1	Prise en compte de consignes locales de gestion visant à respecter un volume d'eau présent minimal ou maximal.....	69
5.6.2	Prise en compte de consignes locales visant une production hydroélectrique	70
6	Application de la méthode avec optimisation d'une répartition figée des tâches (mode 1) entre réservoirs : programme SURVGEST .....	72
6.1	Critères d'évaluation des résultats de VGEST utilisés par la procédure d'optimisation.....	72
6.2	Principes de l'optimisation .....	72
6.2.1	Analyse de sensibilité .....	73
6.2.2	Détermination de la clé de répartition optimale des débits stockés entre réservoirs.....	74
6.3	Exécution du programme SURVGEST.bat .....	76
6.3.1	Paramétrage du calcul.....	76
6.3.2	Résultats .....	77
7	Comparaison de résultats obtenus avec les différents modes de répartition des tâches entre réservoirs.....	78
7.1	Comparaison des méthodes 0 et 1 : intérêt de la prise en compte des volumes d'eau présents pour la répartition des tâches entre réservoirs .....	79
7.1.1	Soutien d'étiage.....	79
7.1.2	Laminage de crue.....	80
7.1.3	Conclusion.....	81
7.2	Comparaison de toutes les méthodes .....	84
7.3	Conclusion .....	85

# 1 OBJECTIF ET RÉSUMÉ

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 limites minimales et maximales du volume d'eau présent à respecter dans les réservoirs que l'on cherche à déterminer.

La méthode proposée, qui correspond à un perfectionnement de la méthode développée en 2012 pour le programme Climaware, est appliquée ici au cas de quatre réservoirs implantés sur le bassin de la Seine. Elle consiste à établir a posteriori les chroniques de volumes extrêmes à respecter, à partir de chroniques journalières du débit naturel des cours d'eau à différentes stations du bassin (station aval où est défini l'objectif, et certaines stations permettant de calculer les débits naturels aux points de prise et de restitution des réservoirs). Cette méthode n'est applicable que pour des réservoirs implantés en parallèle sur le réseau hydrographique. Le cas de réservoirs implantés en série doit être traité différemment.

Pour obtenir à une station un débit égal à un objectif  $QX_{obj}$ , il suffit de soustraire à son débit naturel  $QX_{nat}$  un débit positif ou négatif, qui correspond à un objectif idéal de débit total stocké  $QX_{sous}$  à répartir entre les réservoirs à l'amont. Cette répartition, qui affecte un débit stocké  $QST$  à chaque réservoir, est faite en tenant compte des éléments suivants :

- limites minimales  $QST_{min3}$  et maximales  $QST_{max3}$  de débit stocké dans chaque réservoir, résultant de la combinaison des limites suivantes :
  - $QST_{min1}$  et  $QST_{max1}$  imposées de façon instantanée par les contraintes physiques et réglementaires à la prise et à la restitution (essentiellement : débit entrant inférieur au débit du cours d'eau au droit de la prise et à la débitance maximale des organes de prise ; débit sortant inférieur à la débitance maximale des organes de restitution) et d'éventuelles consignes locales concernant le débit réservé et le débit de référence dans le cours d'eau ;
  - $QST_{min2}$  et  $QST_{max2}$  imposées pour un pas de temps donné par l'état de remplissage du réservoir et sa capacité totale (= volume exploitable maximal) ;
- temps de propagation d'écoulement entre les points de restitution des réservoirs dans le réseau et la station aval, supposés constants ;
- mode de répartition standard du débit à stocker entre les réservoirs, pour lequel plusieurs solutions sont proposées :
  - répartition figée dans le temps, chaque réservoir se voyant alors assigné un pourcentage constant de l'objectif idéal de débit stocké total. Cette répartition peut être faite proportionnellement aux capacités des réservoirs ou suivant une autre clé de répartition, à optimiser ;
  - répartition variable dans le temps, basée sur différents critères pouvant tenir compte des capacités des réservoirs, de leurs états de remplissage et des débits des cours d'eaux au droit de leurs prises.

Selon les cas, les limites imposées localement sur les débits stockés rendent possible ou non l'obtention d'un débit égal à l'objectif à la station aval :

- quand il est impossible d'obtenir à la station aval un débit égal à l'objectif, ce dernier est approché au mieux grâce aux débits stockés minimaux ou maximaux possibles dans tous les réservoirs. Si le débit obtenu à la station aval est inférieur à l'objectif en cas de soutien d'étiage, ou supérieur à l'objectif en cas de laminage de crue, l'écart constaté entre les deux correspond à une défaillance totale de gestion  $QX_{def1}$  composée de deux parties : défaillance "inévitabile absolue"  $QX_{def0}$  due aux limites imposées par les seules contraintes physiques et éventuelles consignes aux prises et restitutions des réservoirs ; défaillance supplémentaire  $QX_{def2}$  due aux limites imposées par les capacités et états de remplissage des réservoirs, s'ajoutant à la précédente et composée elle-même d'une part inévitable et d'une part évitable (par répartition différente des volumes d'eau présents dans les réservoirs)
- quand les limites imposées localement sur les débits stockés dans les réservoirs le permettent, un débit égal à l'objectif peut être obtenu à la station aval par répartition de l'objectif idéal  $QX_{sous}$  de débit total stocké. Cette répartition est effectuée en suivant du mieux possible un mode de répartition standard prédéfini. Quand ce dernier affecte à certains réservoirs des débits stockés incompatibles avec leurs limites locales, les stockages extrêmes sont appliqués sur ces réservoirs, cependant que leur part de débit stocké non prise en charge est affectée aux autres réservoirs, en plus de leurs parts standard.

On considère un objectif de soutien d'étiage ou de laminage de crue caractérisé par un seuil de débit  $QX_{obj}$  à atteindre ou ne pas dépasser à la station aval, ce seuil pouvant être constant ou défini par un hydrogramme annuel reproduit chaque année. Suivant le principe de conservation de masse, l'évolution des volumes d'eau présents dans les différents réservoirs à l'amont est alors simulée au pas de temps journalier en supposant qu'y sont stockés des débits  $QST$  permettant d'obtenir à chaque pas de temps, selon les principes évoqués ci-dessus, un débit le plus proche possible de  $QX_{obj}$  à la station aval. Ceci produit pour chaque réservoir une chronique de volume dont la signification dépend du sens de la simulation :

- calculé en chronologie inverse et donc en avenir connu,  $V_{obj}$  représente la limite de volume qui doit être respectée dans le réservoir pour permettre la meilleure satisfaction future possible de l'objectif. C'est le volume d'eau minimal requis pour un objectif de soutien d'étiage, ou le volume maximal à ne pas dépasser pour un objectif de laminage de crue ;
- calculé dans le sens chronologique et donc en avenir inconnu,  $V_{ges}$  représente la limite du volume pouvant être produit par la meilleure satisfaction passée possible de l'objectif. C'est le volume d'eau maximal pouvant être présent après soutien d'étiage, ou le volume minimal pouvant être présent après laminage de crue. C'est encore le volume présent produit par une gestion opérationnelle visant prioritairement à satisfaire du mieux possible l'objectif aval dans l'immédiat et secondairement à préserver au mieux les conditions optimales pour sa satisfaction future ;
- obtenu par combinaison de  $V_{obj}$  et  $V_{ges}$ ,  $V_{op}$  représente le volume d'eau présent produit par une gestion opérationnelle théorique visant, face à un avenir connu, d'abord à satisfaire l'objectif aval dans l'immédiat, ensuite à préserver au mieux les conditions minimales nécessaires pour sa satisfaction future et enfin à pénaliser le moins possible d'éventuels objectifs concurrentiels.

Dans chaque sens de calcul, la simulation est initialisée avec un jeu de volumes d'eau présents dans les différents réservoirs, déterminé par itération pour coïncider avec les valeurs médianes obtenues le même jour sur l'ensemble des années simulées.

Par ailleurs, le volume global d'eau présent dans l'ensemble des réservoirs est simulé sans prise en compte des limites  $QSTmin2$  et  $QSTmax2$  sur les débits stockés quand celles-ci, imposées dans les différents réservoirs par les volumes présents et les capacités, entraînent des défaillances  $QXdef2$  de satisfaction de l'objectif aval. Dans cette simulation, le volume présent peut prendre des valeurs théoriques situées en dehors de la gamme réelle, négatives ou supérieures à la capacité selon la nature de l'objectif et le sens de la simulation. La différence entre le volume global ainsi obtenu ( $Vobj0$  en chronologie inverse et  $Vges0$  en sens chronologique) et la somme des volumes obtenus par la simulation normale (respectivement  $Vobj$  et  $Vges$ ) donne pour chaque sens de calcul une chronique  $Vdef$  du volume global manquant pour éviter les défaillances  $QXdef2$  dues aux manques de capacités des différents réservoirs.

L'analyse statistique des différentes chroniques simulées permet de définir pour chacune d'entre elles des chroniques annuelles iso-fréquence, dont certaines (en particulier pour  $Vobj$  calculé en chronologie inverse et  $QXdef1$  calculé en sens chronologique) peuvent apporter une aide très utile pour la gestion opérationnelle.

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, selon différents modes de répartition standard du débit à stocker entre réservoirs. Certains développements complémentaires sont présentés, à implémenter dans une future version de VGEST, en vue d'une meilleure représentation des contraintes et consignes locales aux réservoirs (limites de débitance des prises et restitution variables en fonction du volume d'eau présent, prise en compte de consignes locales visant à borner le volume d'eau présent ou à produire de l'hydroélectricité). On décrit ensuite l'utilisation du programme SURVGEST, qui permet d'utiliser VGEST avec une clé de répartition figée du débit à stocker, tout en optimisant celle-ci.

Enfin, les résultats obtenus avec les différents modes de répartition standard du stockage entre réservoirs (y compris le mode anciennement utilisé pour le programme Climaware) sont comparés pour deux objectifs théoriques de gestion de la Seine à Paris (soutien d'étiage à  $125 \text{ m}^3/\text{s}$  et laminage de crue à  $800 \text{ m}^3/\text{s}$ ), à partir des données du régime naturel d'écoulement de la période 1900-2009. Le mode 4 de répartition standard, qui se révèle le plus performant pour ces objectifs, consiste à répartir l'objectif de débit stocké à chaque pas de temps pour qu'à la fin de celui-ci, la durée potentielle minimale  $Tpot1$  de reconstitution du volume utilisable maximal (d'eau ou de vide selon la nature de l'objectif et le sens du calcul) soit la même pour tous les réservoirs, dans l'hypothèse d'un débit moyen dans les cours d'eau au niveau des prises.

## 2 NOTATIONS

*CRITP* ( $\geq 0$ ) : critère principal d'évaluation des résultats obtenus, utilisé pour optimiser une répartition figée des tâches

*CRITS* ( $\geq 0$ ) : critère secondaire d'évaluation des résultats obtenus, utilisé pour optimiser une répartition figée des tâches

*D* ( $\geq 0$ ) : 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* ( $\geq 0$ ) : délai de propagation d'écoulement dans le cours d'eau entre les stations amont et aval de débits naturels *Qam* et *Qav*

*Dint* ( $> 0$ ) : délai de propagation d'écoulement entre la station intermédiaire et la station aval de débits naturels *Qint* et *Qav*

*Dm* ( $\geq 0$ ) : délai de propagation d'écoulement dans le cours d'eau entre le point de prise du réservoir et la station aval de débit naturel *Qav*

*dT* ( $> 0$ ) : incrément de temps

*Dv* ( $> 0$ ) : délai de propagation d'écoulement dans le cours d'eau entre le point de restitution du réservoir et la station aval de débit naturel *Qav*

*Ec* : écart relatif de *VRtot* par rapport à *Vtot*. Cet écart intervient dans le calcul de répartition du stockage objectif entre les réservoirs. Une valeur nulle de *Ec* pour tous les réservoirs entraîne une répartition du stockage proportionnelle, si possible, à leurs volumes totaux exploitables *Vtot*

*F* : fréquence de non dépassement (supérieur à 0 et inférieur à 1)

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

*K* : nombre de réservoirs (entre 1 et 4) situés à l'amont de la station où est défini l'objectif de débit

*P* : exposant utilisé dans le calcul des défaillances moyennes

*Part* : part théorique (entre 0 et 1 ; somme sur les réservoirs égale à 1) de l'objectif de débit stocké *QXsous* assignée au réservoir

*Partv* : part de travail du réservoir (entre 0 et 1 ; somme sur les réservoirs égale à 1), calculée en fonction des volumes *V* présents dans les différents réservoirs

*Partt* : part de travail du réservoir (entre 0 et 1 ; somme sur les réservoirs égale à 1), calculée en fonction des durées potentielles minimales de reconstitution de volume utilisable maximal des différents réservoirs (calculées dans l'hypothèse de débits constants des cours d'eau, égaux à leurs moyennes interannuelles)

*Pmax* ( $\geq 0$ ) : puissance maximale productible pour un réservoir, variable en fonction du volume d'eau présent

$P_{obj} (\geq 0)$  : objectif de puissance hydroélectrique à produire pour un réservoir

$Q_{am} (\geq 0)$  : débit naturel du cours d'eau à la première station située à l'amont de la restitution du réservoir

$Q_{av} (\geq 0)$  : débit naturel du cours d'eau à la première station située à l'aval de la restitution du réservoir

$QE (\geq 0)$  : débit pris par le réservoir dans le cours d'eau au point de prise

$QE_{inf} (\geq 0)$  : valeur minimale du débit pris dans le cours d'eau et envoyé dans le réservoir, imposée par les contraintes physiques et consignes de gestion locales à la prise

$QE_{max} (>0)$  : débitance maximale de la prise imposée par contraintes physiques

$QE_{min} (\geq 0)$  : débitance minimale de la prise imposée par contraintes physiques (obligatoirement inférieure à  $QS_{max}$  ; nulle en principe, sauf cas très particulier)

$QE_{sup} (\geq 0)$  : valeur maximale du débit dans le canal de prise, imposée par les contraintes physiques et consignes de gestion locales

$Q_{int} (\geq 0)$  : 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

$QM_{moy} (>0)$  : valeur moyenne interannuelle (ou module) du débit naturalisé du cours d'eau à l'amont immédiat du point de prise du réservoir

$QM_{nat} (\geq 0)$  : débit naturalisé du cours d'eau à l'amont immédiat du point de prise du réservoir

$QM_{ref} (\geq 0)$  : débit de référence du cours d'eau juste à l'aval de la prise (maximum à ne pas dépasser si possible)

$QM_{res} (\geq 0)$  : débit réservé du cours d'eau juste à l'aval de la prise (minimum à maintenir si possible)

$QS (\geq 0)$  : débit restitué par le réservoir dans le cours d'eau au point de restitution

$QS_{max} (>0)$  : limite maximale du débit restitué dans le cours d'eau à partir du réservoir, imposée par les contraintes physiques et réglementaires locales à la restitution

$QS_{min} (\geq 0)$  : limite minimale du débit restitué dans le cours d'eau à partir du réservoir, imposée par les contraintes physiques et réglementaires locales à la restitution (obligatoirement inférieure à  $QE_{max}$ )

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

$QST_{max0} (>0)$  : valeur maximale du débit stocké net dans le réservoir imposée par les contraintes à la prise et à la restitution, fonction du débit du cours d'eau à l'amont immédiat de la prise

$QST_{max1}$  : valeur maximale (positive ou négative) du débit stocké net dans le réservoir, imposée par les contraintes physiques et réglementaires et les consignes locales à la prise et à la restitution

$QST_{max1'}$  : valeur maximale (positive ou négative) du débit stocké net dans le réservoir, imposée par les contraintes et consignes locales à la prise et à la restitution ainsi que par une consigne locale bornant le volume d'eau présent autorisé

$QST_{max1''}$  : valeur maximale (positive ou négative) du débit stocké net dans le réservoir, imposée par les contraintes et consignes locales à la prise et à la restitution ainsi que par une consigne locale visant une production hydroélectrique

$QST_{max2}$  ( $\geq 0$ ) : valeur maximale du débit stocké net dans le réservoir, imposée par la capacité du réservoir et son état de remplissage

$QST_{max3}$  : valeur maximale (positive ou négative) du débit stocké net dans le réservoir, imposée par la capacité du réservoir et son état de remplissage, ainsi que par les contraintes et consignes locales à la prise et à la restitution

$QST_{max4}$  : valeur maximale du débit stocké net dans le réservoir imposée par une consigne locale bornant le volume d'eau présent autorisé

$QST_{max5}$  : valeur maximale du débit stocké net dans le réservoir imposée par une consigne locale visant une production hydroélectrique

$QST_{min0}$  ( $< 0$ ) : valeur minimale du débit stocké net dans le réservoir imposée par les contraintes à la prise et à la restitution, fonction du débit du cours d'eau à l'amont immédiat de la prise

$QST_{min1}$  : valeur minimale (positive ou négative) du débit stocké net dans le réservoir, imposée par les contraintes physiques et réglementaires et les consignes locales à la prise et à la restitution

$QST_{min1'}$  : valeur minimale (positive ou négative) du débit stocké net dans le réservoir, imposée par les contraintes et consignes locales à la prise et à la restitution ainsi que par une consigne locale bornant le volume d'eau présent autorisé

$QST_{min1''}$  : valeur minimale (positive ou négative) du débit stocké net dans le réservoir, imposée par les contraintes et consignes locales à la prise et à la restitution ainsi que par une consigne locale visant une production hydroélectrique

$QST_{min2}$  ( $\leq 0$ ) : valeur minimale du débit stocké net dans le réservoir, imposée par la capacité du réservoir et son état de remplissage

$QST_{min3}$  : valeur minimale (positive ou négative) du débit stocké net dans le réservoir, imposée par la capacité du réservoir et son état de remplissage, ainsi que par les contraintes et consignes locales à la prise et à la restitution

$QST_{min4}$  : valeur minimale du débit stocké net dans le réservoir imposée par une consigne locale bornant le volume d'eau présent autorisé

$QST_{min5}$  : valeur minimale du débit stocké net dans le réservoir imposée par une consigne locale visant une production hydroélectrique

$QST_{pot}$  : valeur théorique (positive ou négative) de débit stocké net par réservoir visant à équilibrer en fin de pas de temps, selon le mode de répartition choisi, les taux de remplissage, les durées potentielles minimales de reconstitution de volume utilisable  $V_{ut}$

maximal ou les durées potentielles d'épuisement de volume utilisable, tout en assurant la satisfaction de l'objectif aval

$QST0a$  : stockage net (positif ou négatif) de débit par rapport au régime naturel, à répartir entre plusieurs réservoirs au meilleur prorata possible de leurs parts assignées respectives pour obtenir un débit stocké net global égal à  $QXsous$

$QST0b$ : décalage (positif ou négatif) ajouté aux valeurs théoriques  $QSTpot$  de débit stocké net assignées aux différents réservoirs, pour obtenir des valeurs  $QST$  qui sont compatibles avec les contraintes et consignes locales et satisfont l'objectif aval tout en respectant du mieux possible l'équilibre des tâches adopté

$QSup (\geq 0)$  : débit des apports intermédiaires reçus par le cours d'eau entre les points de prise et de restitution

$Qtmin (\geq 0)$  : débit turbiné minimal nécessaire pour la production d'une puissance  $Pobj$

$QV (\geq 0)$  : débit du cours d'eau influencé par le réservoir, à l'aval immédiat de la restitution

$QVnat (\geq 0)$  : débit naturalisé du cours d'eau à l'aval immédiat du point de restitution du réservoir

$QVref (>0)$  : débit de référence du cours d'eau juste à l'aval de la restitution (maximum à ne pas dépasser si possible)

$QVres (\geq 0)$  : débit réservé du cours d'eau juste à l'aval de la restitution (minimum à maintenir si possible)

$QXdef0 (\geq 0)$  : défaillance inévitable absolue de satisfaction de l'objectif aval, correspondant à un 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 aux prises et restitutions des réservoirs et obtenu quels que soient les capacités des réservoirs et les volumes d'eau présents dans ceux-ci

$QXdef1 (\geq 0)$  : défaillance totale de satisfaction de l'objectif aval, correspondant à un excès (resp. manque) de débit à la station aval par rapport à l'objectif de laminage (resp. soutien) de débit, dû aux contraintes physiques et consignes de gestion locales aux prises et restitutions, ainsi qu'aux volumes d'eau présents dans les réservoirs et aux capacités de ceux-ci.

$QXdef2 (\geq 0)$  : défaillance supplémentaire de satisfaction de l'objectif aval due aux capacités des réservoirs et volumes d'eau présents dans ceux-ci, s'ajoutant à la défaillance inévitable absolue  $QXdef0$  pour former la défaillance totale  $QXdef1$

$QXnat (\geq 0)$  : débit naturel à la station X située à l'aval du système, où est localisé l'objectif de débit

$QXobj (>0)$  : objectif de débit visé à la station X située à l'aval du système

$QXsous$  : débit (positif ou négatif) à soustraire à celui du régime naturel à la station aval du système pour y obtenir un débit égal à  $QXobj$  dans le cours d'eau

$R$  : volume exploitable fictif d'un réservoir en cours d'optimisation, rapporté à la somme des volumes exploitables fictifs de réservoirs qui n'ont pas encore été optimisés

$R_e$  : rendement d'usine de production hydroélectrique (entre 0 et 1)

$R_{el}$  : constante intervenant dans le processus d'optimisation d'une clé de répartition figée des débits à stocker entre réservoirs. Plus  $R_{el}$  est petit, plus chaque nouvelle clé testée est éloignée de l'optimum en cours.

$R_{max}$  : valeur maximale des valeurs de  $R$  à tester

$R_{min}$  : valeur minimale des valeurs de  $R$  à tester

$R_{opt}$  : optimum en cours de  $R$

$S_{am}$  (>0) : superficie de bassin versant contrôlé par la station amont de débit naturel  $Q_{am}$

$S_{av}$  (>0) : superficie de bassin versant contrôlée par la station aval de débit naturel  $Q_{av}$

$SENSP$  : sensibilité du critère principal  $CRITP$  vis-à-vis de la variation du volume exploitable fictif  $VR_{tot}$  d'un réservoir

$SENSS$  : sensibilité du critère secondaire  $CRITS$  vis-à-vis de la variation du volume exploitable fictif  $VR_{tot}$  d'un réservoir

$Seuil$  : seuil de convergence de l'optimisation de la clé de répartition figée des débits à stocker entre réservoirs

$S_{int}$  (>0) : superficie de bassin versant contrôlée par la station intermédiaire de débit naturel  $Q_{int}$

$S_m$  (>0) : superficie de bassin versant du cours d'eau au point de prise du réservoir

$S_v$  (>0) : superficie de bassin versant du cours d'eau au point de restitution du réservoir

$T$  : temps

$Teil$  : constante intervenant dans le calcul de sensibilité des critères  $CRITP$  et  $CRITS$  vis-à-vis de la clé de répartition des débits à stocker entre réservoirs. Plus  $Teil$  est petit, plus l'analyse de sensibilité est faite sur des clés de répartition proches de la clé de répartition standard

$T_{fin}$  (>  $T_{init}$ ) : date de fin de la période de calcul

$T_{init}$  (<  $T_{fin}$ ) : date de début de la période de calcul

$T_{pot}$  ( $\geq 0$ ) : durée minimale d'évolution du réservoir entre la valeur courante et la valeur maximale de volume  $V_{ut}$  utilisable pour satisfaire l'objectif, compte tenu des contraintes physiques locales

$T_{pot1}$  ( $\geq 0$ ) : durée potentielle minimale de reconstitution du volume utilisable  $V_{ut}$  maximal à partir de la fin de pas de temps, calculée en tenant compte des contraintes physiques à la prise et à la restitution mais pas des consignes locales de gestion

$T_{pot2}$  ( $\geq 0$ ) : durée potentielle d'épuisement du volume utilisable  $V_{ut}$  à partir de la fin de pas de temps, calculée en tenant compte des contraintes physiques à la prise et à la restitution mais pas des consignes de gestion

$V (\geq 0)$  : volume d'eau exploitable présent dans le réservoir (supérieur ou égal à 0 et inférieur ou égal à  $V_{tot}$ )

$VPOT$  : valeur théorique de  $V$  en fin de pas de temps (pouvant prendre n'importe quelle valeur, y compris en dehors de l'intervalle  $[0, V_{tot}]$ ), permettant l'égalité de  $T_{pot1}$  (durée minimale de reconstitution de volume utilisable maximal) ou  $T_{pot2}$  (durée d'épuisement du volume utilisable), selon le mode de répartition choisi entre réservoirs

$VPOTa$  : valeur de  $VPOT$  produite par l'itération précédente, dans le processus itératif de détermination de  $VPOT$

$VPOTm$  : valeur de  $VPOT$  dans le meilleur jeu produit par les itérations précédentes (celui qui donne la plus faible dispersion de  $T_{pot1}$  ou  $T_{pot2}$  entre les réservoirs), dans le processus itératif de détermination de  $VPOT$

$VPOTn$  : nouvelle valeur de  $VPOT$  produite par l'itération en cours, dans le processus itératif de détermination de  $VPOT$

$V_{def} (\geq 0)$  : manque de capacité exploitable globale des réservoirs, responsable des défaillances supplémentaires  $QX_{def2}$  s'ajoutant aux défaillances inévitables absolues  $QX_{def0}$  provoquées par les contraintes physiques et consignes locales aux prises et restitutions

$V_{ges}$  : volume d'eau exploitable présent dans le réservoir (supérieur ou égal à 0 et inférieur ou égal à  $V_{tot}$ ), résultant d'une gestion opérationnelle préoccupée du seul objectif aval. Cette gestion vise prioritairement à satisfaire du mieux possible cet objectif dans l'immédiat, et secondairement à préserver les conditions optimales pour sa meilleure satisfaction future..  $V_{ges}$  est ainsi le plus grand (respectivement, le plus petit) volume pouvant résulter d'une gestion opérationnelle satisfaisant du mieux possible un objectif aval de soutien d'étiage (respectivement, de laminage de crue)

$V_{max}$  : volume d'eau maximal permis dans le réservoir par une consigne locale

$V_{min}$  : volume d'eau minimal permis dans le réservoir par une consigne locale

$V_{obj}$  : valeur limite du volume d'eau exploitable présent (supérieur ou égal à 0 et inférieur ou égal à  $V_{tot}$ ) qu'il faut respecter dans le réservoir pour pouvoir satisfaire du mieux possible l'objectif aval par la suite : volume minimal nécessaire pour un objectif de soutien d'étiage ; volume maximal à ne pas dépasser pour un objectif de laminage de crue.  $V_{obj}$  décrit les conditions minimales nécessaires pour la meilleure satisfaction de l'objectif par la suite.

$V_{op}$  : volume d'eau exploitable présent dans le réservoir (supérieur ou égal à 0 et inférieur ou égal à  $V_{tot}$ ), résultant d'une gestion opérationnelle préoccupée de satisfaire au mieux l'objectif aval, tout en pénalisant le moins possible d'éventuels objectifs concurrentiels. Cette gestion vise prioritairement à satisfaire du mieux possible l'objectif aval dans l'immédiat, et si possible à préserver les conditions minimales pour sa meilleure satisfaction future.  $V_{op}$  est ainsi le plus petit (respectivement, le plus grand) volume pouvant résulter d'une gestion opérationnelle satisfaisant du mieux possible un objectif aval de soutien d'étiage (respectivement, de laminage de crue) sur l'ensemble de la période analysée

$VR_{tot} (\geq 0)$  : volume total exploitable fictif du réservoir (valeur utilisée seulement pour le calcul de répartition entre réservoirs du débit idéal à stocker)

$VRTT$  : somme des volumes exploitables fictifs  $VRtot$  des réservoirs dont les valeurs ont déjà été optimisées

$VT$  : somme des volumes exploitables réels  $Vtot$  des réservoirs

$VTges0$  : correspond à une somme virtuelle de  $Vges$  sur l'ensemble des réservoirs, calculée en supposant que le volume  $V$  dans chaque réservoir peut prendre, si nécessaire, des valeurs inférieures à 0 ou supérieures à  $Vtot$  pour éviter toute défaillance supplémentaire  $QXdef2$  s'ajoutant aux défaillances inévitables absolues  $QXdef0$ . Pour un objectif de soutien d'étiage, les valeurs de  $VTges0$  sont inférieures ou égales à  $\sum Vtot$  et peuvent être négatives. Pour un objectif de laminage de crue, elles sont positives et peuvent être supérieures à  $\sum Vtot$ .

$VTobj0$  : correspond à une somme virtuelle de  $Vobj$  sur l'ensemble des réservoirs, calculée en supposant que le volume  $V$  dans chaque réservoir peut prendre, si nécessaire, des valeurs inférieures à 0 ou supérieures à  $Vtot$  pour éviter toute défaillance supplémentaire  $QXdef2$  s'ajoutant aux défaillances inévitables absolues  $QXdef0$ . Pour un objectif de soutien d'étiage, les valeurs de  $VTobj0$  sont positives et peuvent être supérieures à  $\sum Vtot$ . Pour un objectif de laminage de crue, elles sont inférieures ou égales à  $\sum Vtot$  et peuvent être négatives.

$Vtot (>0)$  : volume total exploitable réel du réservoir

$VTT$  : somme des volumes exploitables réels  $Vtot$  des réservoirs dont le volume exploitable fictif  $VRtot$  a déjà été optimisé

$Vut (\geq 0)$  : volume utilisable dans le réservoir pour satisfaire l'objectif, égal selon les cas, soit au volume d'eau exploitable présent, soit au volume de vide exploitable présent

$X$  : coefficient de relaxation utilisé dans le mode 5 de répartition des tâches entre réservoirs

$Y$  : coefficient de relaxation utilisé dans le mode 5 de répartition des tâches entre réservoirs

$\Delta P$  : écart de la part relative des différents réservoirs autour de leur part standard, utilisée pour les tests de sensibilité

### 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)	<i>Qav</i>			<i>Sav</i>	3899.6
Seine	restitution	<i>QVnat</i>	<i>Dv</i>	34.0	<i>Sv</i>	2900.3
Seine	prise	<i>QMnat</i>	<i>Dm</i>	60.0	<i>Sm</i>	2384.2
Seine	Bar sur Seine (amont)	<i>Qam</i>	<i>Dam</i>	65.0	<i>Sam</i>	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)	<i>Qav</i>			<i>Sav</i>	3594.6
Aube	restitution	<i>QVnat</i>	<i>Dv</i>	17.0	<i>Sv</i>	2529.0
Aube	prise	<i>QMnat</i>	<i>Dm</i>	47.0	<i>Sm</i>	1572.0
Aube	Trannes (amont)	<i>Qam</i>	<i>Dam</i>	49.0	<i>Sam</i>	1557.1
Voire	Lassicourt (intermédiaire)	<i>Qint</i>	<i>Dint</i>	17.0	<i>Sint</i>	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)	<i>Qav</i>			<i>Sav</i>	6291.5
Marne	restitution 1	<i>QVnat1</i>	<i>Dv1</i>	31.0	<i>Sv1</i>	2515.2
Marne	Saint Dizier (amont 1)	<i>Qam1</i>	<i>Dam1</i>	42.0	<i>Sam1</i>	2347.5
Marne	prise 1	<i>QMnat1</i>	<i>Dm1</i>	42.0	<i>Sm1</i>	2289.9
Blaise	restitution 2	<i>QVnat2</i>	<i>Dv2</i>	31.0	<i>Sv2</i>	533.2
Blaise	prise 2	<i>QMnat2</i>	<i>Dm2</i>	45.0	<i>Sm2</i>	485.4
Blaise	Louvemont (amont 2)	<i>Qam2</i>	<i>Dam2</i>	45.0	<i>Sam2</i>	461.7
Saulx	Vitry (intermédiaire)	<i>Qint</i>	<i>Dint</i>	42.0	<i>Sint</i>	2109.1

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

## 4 MÉTHODE

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

Les calculs effectués plus bas utilisent les débits naturalisés  $QMnat$  et  $QVnat$  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  $QMnat$  et  $QVnat$  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),  $QMnat$  et  $QVnat$  sont évalués ainsi au temps  $T$  (avec  $Qint$  et  $Sint$  nuls pour Seine) :

$$QMnat(T) = \max(0 ; Qam(T+Dm-Dam) + (Qav(T+Dm) - Qint(T+Dm-Dint) - Qam(T+Dm-Dam)) * (Sm - Sam) / (Sav - Sint - Sam)) \quad [1]$$

$$QVnat(T) = \max(0 ; Qam(T+Dv-Dam) + (Qav(T+Dv) - Qint(T+Dv-Dint) - Qam(T+Dv-Dam)) * (Sv - Sam) / (Sav - Sint - Sam)) \quad [2]$$

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  $QMnat$  de cours d'eau à la prise, égal à la somme des débits  $QMnat1$  et  $QMnat2$  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  $QVnat$  à une unique restitution, obtenu en sommant les débits  $QVnat1$  et  $QVnat2$  aux restitutions respectives. Le détail des calculs est donné ci-dessous :

$$QMnat1(T) = \max(0 ; Qam1(T+Dm1-Dam1) + (Qav(T+Dm1) - Qint(T+Dm1-Dint) - Qam2(T+Dm1-Dam2) - Qam1(T+Dm1-Dam1)) * (Sm1 - Sam1) / (Sav - Sint - Sam1 - Sam2)) \quad [3]$$

$$QMnat2(T) = \max(0 ; Qam2(T+Dm2-Dam2) + (Qav(T+Dm2) - Qint(T+Dm2-Dint) - Qam2(T+Dm2-Dam2) - Qam1(T+Dm2-Dam1)) * (Sm2 - Sam2) / (Sav - Sint - Sam1 - Sam2)) \quad [4]$$

$$QVnat1(T) = \max(0 ; Qam1(T+Dv1-Dam1) + (Qav(T+Dv1) - Qint(T+Dv1-Dint) - Qam2(T+Dv1-Dam2) - Qam1(T+Dv1-Dam1)) * (Sv1 - Sam1) / (Sav - Sint - Sam1 - Sam2)) \quad [5]$$

$$QVnat2(T) = \max(0 ; Qam2(T+Dv2-Dam2) + (Qav(T+Dv2) - Qint(T+Dv2-Dint) - Qam2(T+Dv2-Dam2) - Qam1(T+Dv2-Dam1)) * (Sv2 - Sam2) / (Sav - Sint - Sam1 - Sam2)) \quad [6]$$

$$QMnat(T) = QMnat1(T) + QMnat2(T) \quad [7]$$

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

[8]

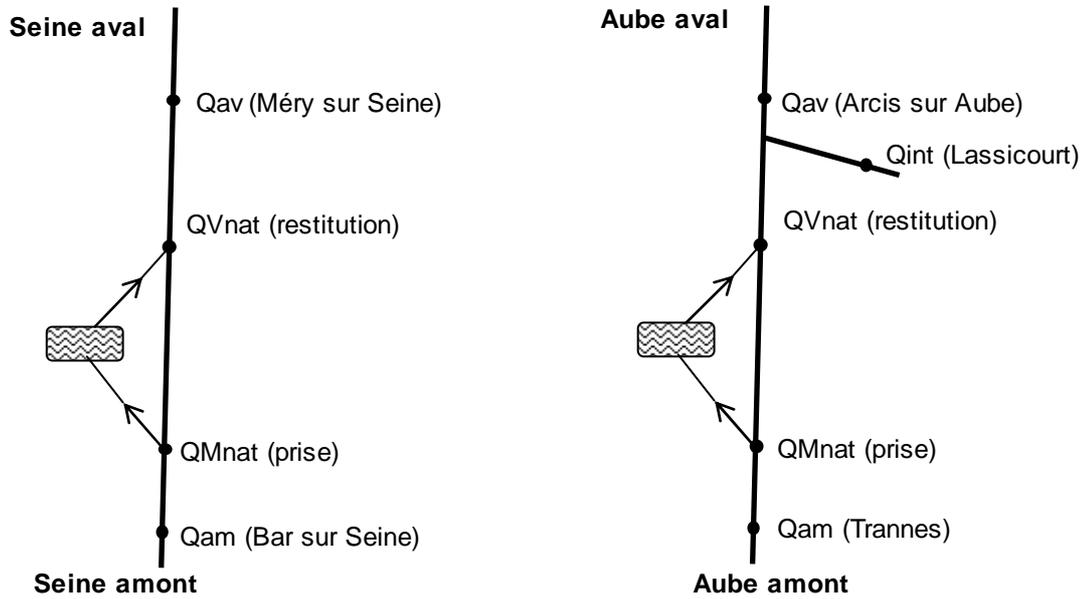


Figure 4.1.A : schéma localisant les débits naturels des cours d'eau autour des réservoirs Seine et Aube

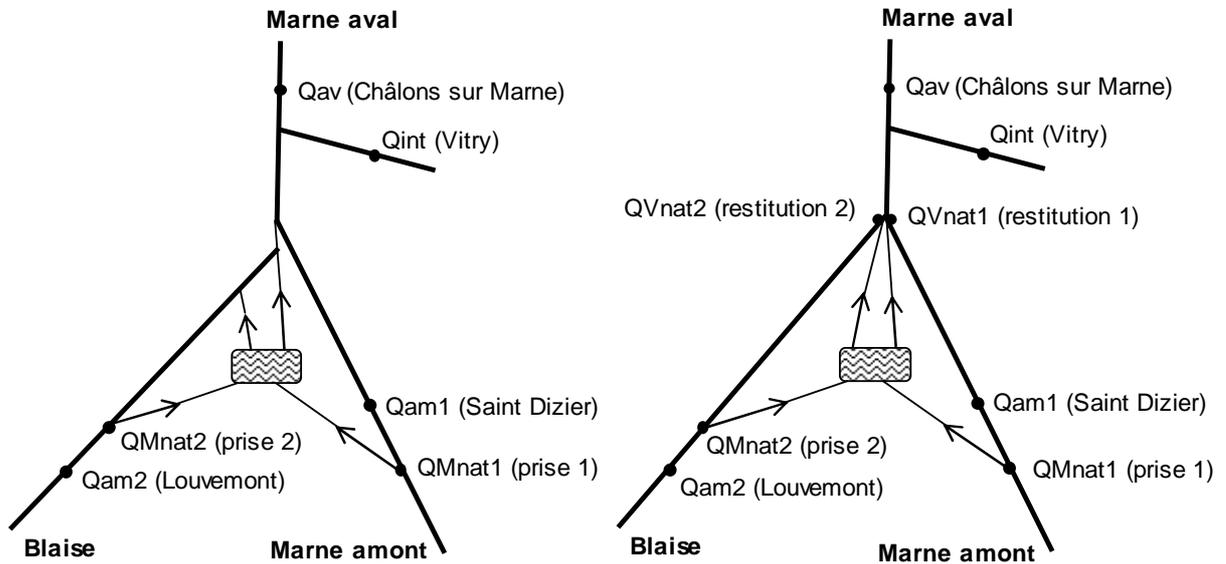


Figure 4.1.B : schéma localisant les débits naturels des cours d'eau autour du réservoir Marne (configuration réelle à gauche et simplification adoptée pour les calculs, à droite)

## 4.2 LIMITES IMPOSÉES PAR LES CONTRAINTES PHYSIQUES ET CONSIGNES DE GESTION À LA PRISE ET À LA RESTITUTION SUR LE DÉBIT STOCKÉ NET DANS UN RÉSERVOIR.

Les calculs présentés concernent le cas général d'un réservoir implanté en dérivation sur un cours d'eau. Moyennant l'utilisation de paramètres adaptés (voir plus bas), ils peuvent s'appliquer au cas particulier d'un réservoir implanté directement sur un cours d'eau.

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 du réservoir, et on suppose un sens d'écoulement irréversible dans tout le réseau encadrant celui-ci. Sauf mention contraire, toutes les variables de débit ne prennent que des valeurs positives ou nulles.

Sans tenir compte de l'état de remplissage du réservoir (pris en compte plus loin), on évalue ici les valeurs limites de débit stocké net  $Q_{ST}$  dans le réservoir à un instant donné, imposées par les seules contraintes physiques et consignes locales concernant la prise et la restitution du réservoir. Ces valeurs limites sont instantanées et ne dépendent pas du pas de temps utilisé dans les calculs.

### 4.2.1 Contraintes physiques et consignes de gestion à la prise

Les sens d'écoulement étant irréversibles, le débit  $Q_E$  pris dans le cours d'eau et dirigé vers le réservoir ne peut à aucun moment excéder le débit naturel  $Q_{Mnat}$  du cours d'eau à l'amont immédiat du point de prise. Cette règle, qui prévaut sur toutes les autres, constitue une contrainte physique de gestion de priorité absolue, toujours respectée. Les autres contraintes physiques de gestion concernant la prise sont imposées par sa débitance minimale  $Q_{Emin}$  (considérée infinie pour un réservoir implanté directement sur un cours d'eau, et nulle, sauf cas très particulier, pour un réservoir implanté en dérivation) et sa débitance maximale  $Q_{Emax}$ , éventuellement variables en fonction du volume d'eau présent dans le réservoir. Ces deux contraintes sont toujours respectées, sauf dans le cas très particulier d'une débitance minimale  $Q_{Emin}$  strictement positive et supérieure au débit  $Q_{Mnat}$ .

Compte tenu de leur ordre de priorité, les contraintes physiques à la prise imposent de façon absolue l'encadrement suivant, toujours respecté, du débit  $Q_E$  pris dans le cours d'eau et dérivé vers le réservoir :

$$\min(Q_{Mnat}, Q_{Emin}) \leq Q_E \leq \min(Q_{Mnat}, Q_{Emax}) \quad [9]$$

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

$$Q_{Mnat} - Q_E \geq Q_{Mres} \Rightarrow Q_E \leq Q_{Mnat} - Q_{Mres} \quad [10]$$

$$Q_{Mnat} - Q_E \leq Q_{Mref} \Rightarrow Q_E \geq Q_{Mnat} - Q_{Mref} \quad [11]$$

Dans tous les cas, les contraintes physiques 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 les valeurs minimale  $Q_{Einf}$  et maximale  $Q_{Esup}$  du débit  $Q_E$  entrant, toujours respectées :

$$QE_{inf} \leq QE \leq QE_{sup} \quad [12]$$

$$QE_{sup} = \min(\min[QMnat ; QE_{max}] ; \max[\min(QMnat ; QE_{min}) ; QMnat - QMres]) \quad [13]$$

$$QE_{inf} = \max(\min[QMnat ; QE_{min}] ; \min[\min(QMnat ; QE_{max}) ; QMnat - QMref]) \quad [14]$$

Remarque : le cas d'un réservoir implanté directement sur un cours d'eau peut être représenté avec le jeu de paramètres suivant, qui conduit à l'égalité de  $QE$  et  $QMnat$  avec les relations 12 à 14 :

- $QE_{min} = +\infini ; QE_{max} = +\infini ; QMres=0 ; QMref=0$

#### **4.2.2 Contraintes physiques et consignes de gestion à la restitution**

Les contraintes physiques et réglementaires de gestion concernant la restitution du réservoir sont sa débitance minimale  $QS_{min}$  et sa débitance maximale  $QS_{max}$ . Ces débitances extrêmes, susceptibles de varier en fonction du volume d'eau présent dans le réservoir, imposent les inégalités suivantes au débit  $QS$  restitué par le réservoir dans le cours d'eau au point de restitution :

$$QS_{min} \leq QS \leq QS_{max} \quad [15]$$

Quant à elles, les consignes de gestion applicables à l'aval immédiat du point de restitution (débit réservé  $QVres$  et de référence  $QVref$ ) consistent à faire respecter du mieux possible les inégalités suivantes au débit  $QV$  du cours d'eau en ce point :

$$QVres \leq QV \leq QVref \quad [16]$$

#### **4.2.3 Conséquences des contraintes physiques et règles de gestion à la prise et à la restitution sur le débit stocké net**

En négligeant les précipitations et les pertes par évaporation et infiltration, on peut exprimer ainsi le débit stocké net  $QST$  dans le réservoir à partir des valeurs naturelle  $QVnat$  et influencée  $QV$  du cours d'eau à l'aval immédiat du point de restitution du réservoir :

$$QST = QVnat - QV \quad [17]$$

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, qui relient les valeurs du débit du cours d'eau à l'aval immédiat de la restitution et à l'amont immédiat de la prise en tenant compte du débit  $QSup$  des apports intermédiaires entre ces deux points, successivement en régime naturel et influencé :

$$QVnat = QMnat + QSup \quad [18]$$

$$QV = QMnat - QE + QSup + QS \quad [19]$$

Les relations 18 et 19 donnent :

$$QE - QS = QMnat + QSup - QV = QVnat - QV \quad [20]$$

Par ailleurs, les relations 17 et 20 donnent :

$$QST = QE - QS \quad [21]$$

Cette relation, combinée aux relations 12 et 15 imposées par les contraintes physiques et consignes locales à la prise et à la restitution, impose l'encadrement suivant pour le débit stocké  $QST$  :

$$QE_{inf} - QS_{max} \leq QST \leq QE_{sup} - QS_{min} \quad [22]$$

Par ailleurs, d'après la relation 17, les consignes concernant la restitution (relations 16) imposent de respecter du mieux possible l'encadrement suivant de  $QST$  :

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

Le respect des relations 22, qui sont prioritaires, combiné au meilleur respect possible des consignes à la restitution (relations 23) donne l'encadrement suivant de  $QST$  par  $QST_{min1}$  et  $QST_{max1}$ , limites minimale et maximale du débit stocké net imposées par les contraintes physiques et réglementaires et les consignes de gestion locales à la prise et à la restitution :

$$QST_{min1} \leq QST \leq QST_{max1} \quad [24]$$

$$QST_{min1} = \max(QE_{inf} - QS_{max} ; \min[QE_{sup} - QS_{min} ; QV_{nat} - QV_{ref}]) \quad [25]$$

$$QST_{max1} = \min(QE_{sup} - QS_{min} ; \max[QE_{inf} - QS_{max} ; QV_{nat} - QV_{res}]) \quad [26]$$

Les valeurs de  $QST_{min1}$  comme celles de  $QST_{max1}$  peuvent être positives ou négatives et les contraintes physiques et règles de gestion locales peuvent donc à elles seules imposer dans certains cas le signe du débit stocké net. En combinant les relations 13, 14, 25 et 26, on peut montrer que :

- $QST_{min1}$  est positif et impose un débit stocké  $QST$  positif quand l'inégalité suivante est vérifiée :

$$\max(\min[QE_{max} ; QM_{nat} - QM_{ref}] - QS_{max} ; \min[\max(\min\{QM_{nat} ; QE_{min}\} ; \min\{QE_{max} ; QM_{nat} - QV_{res}\}) - QS_{min} ; QV_{nat} - QV_{ref}]) > 0 \quad [27]$$

- $QST_{max1}$  est négatif et impose un débit stocké  $QST$  négatif quand l'inégalité suivante est vérifiée :

$$\min(\min[QM_{nat} ; \max(QE_{min} ; QM_{nat} - QM_{res})] - QS_{min} ; \max[QV_{nat} - QV_{res} ; \min(QM_{nat} ; \max(QE_{min} ; \min(QE_{max} ; QM_{nat} - QM_{ref}))) - QS_{max}]) < 0 \quad [28]$$

#### **4.3 LIMITES IMPOSÉES PAR LA CAPACITÉ ET L'ÉTAT DE REMPLISSAGE D'UN RÉSERVOIR SUR LE DÉBIT STOCKÉ NET DANS CELUI-CI**

A partir d'ici, on distingue pour certaines relations les écritures destinées respectivement aux simulations en sens chronologique et aux simulations en sens chronologique inverse, dont l'utilité est expliquée plus bas (à partir du paragraphe 4.7). Ces écritures, qui utilisent des pas de temps  $dT$  centrés sur les temps  $T$ , font référence à des volumes datés en fin ou en début de pas de temps, et à des débits centrés sur les pas de temps.

On fait l'hypothèse que le niveau de plan d'eau dans le réservoir se situe obligatoirement entre une cote minimale et une cote maximale, qui correspondent respectivement à un

volume d'eau exploitable nul et égal à  $V_{tot}$ . En notant  $dT$  un pas de temps positif et  $V$  le volume d'eau exploitable présent dans le réservoir, cette contrainte physique locale dans le réservoir impose au temps  $T$  une limite minimale  $QST_{min2}$  (négative ou nulle) et une limite maximale  $QST_{max2}$  (positive ou nulle) au débit stocké net dans le réservoir :

- en chronologie normale, entre les temps  $T-dT/2$  et  $T+dT/2$  :

$$QST_{min2}(T) = - V(T-dT/2)/dT \quad [29]$$

$$QST_{max2}(T) = (V_{tot}-V(T-dT/2))/dT \quad [30]$$

- en chronologie inverse, entre les temps  $T+dT/2$  et  $T-dT/2$  :

$$QST_{min2}(T) = (V(T+dT/2)-V_{tot})/dT \quad [31]$$

$$QST_{max2}(T) = V(T+dT/2)/dT \quad [32]$$

On fait l'hypothèse que la contrainte physique liée au volume d'eau exploitable  $V$  présent dans le réservoir prévaut sur les contraintes physiques et règles de gestion à la prise et à la restitution mentionnées plus haut. Sa combinaison avec ces dernières donne finalement la valeur minimale  $QST_{min3}$  (positive ou négative) et la valeur maximale  $QST_{max3}$  (positive ou négative) du débit stocké net  $QST$ , imposées par l'ensemble des contraintes physiques et règles de gestion locales :

$$QST_{min3} = \max(QST_{min2} ; \min[QST_{max2} ; QST_{min1}]) \quad [33]$$

$$QST_{max3} = \min(QST_{max2} ; \max[QST_{min2} ; QST_{max1}]) \quad [34]$$

Quels que soient les objectifs de gestion à l'aval du réservoir, le débit stocké net  $QST$  dans celui-ci vérifie de façon absolue les inégalités suivantes :

$$QST_{min3} \leq QST \leq QST_{max3} \quad [35]$$

Remarque : on a vu plus haut que les contraintes physiques et réglementaires à la prise et à la restitution étaient prioritaires sur les consignes de gestion locales et pouvaient de ce fait, dans certains cas, empêcher certaines de ces dernières d'être respectées. De la même façon, la contrainte physique liée au volume présent dans le réservoir étant de priorité absolue, celle-ci peut empêcher le respect des contraintes à la restitution dans certains cas très particuliers :

- Quand le débit  $QMnat(T)$  est inférieur à une débitance minimale  $QSmin$  non nulle à la restitution, il est impossible entre les instants  $T-dT/2$  et  $T+dT/2$  (si  $V(T-dT/2) < (QSmin - QMnat(T)) \times dT$ ), ou entre les instants  $T+dT/2$  et  $T-dT/2$  (si  $V(T+dT/2) > V_{tot} - (QSmin - QMnat(T)) \times dT$ ), de respecter parfaitement cette débitance minimale  $QSmin$ . Cette contrainte ne peut alors être respectée que partiellement, du mieux possible, avec le plus fort débit restitué compatible avec  $V$  et  $QMnat$  ;
- dans le cas d'un réservoir implanté directement sur un cours d'eau, quand le débit  $QMnat(T)$  est supérieur à  $QSmax$ , il est impossible entre les instants  $T-dT/2$  et  $T+dT/2$  (si  $V(T-dT/2) > V_{tot} - (QMnat(T) - QSmax) \times dT$ ) ou entre les instants  $T+dT/2$  et  $T-dT/2$  (si  $V(T+dT/2) < (QMnat(T) - QSmax) \times dT$ ) de respecter la contrainte de débitance maximale  $QSmax$  de la restitution. Cette contrainte ne peut alors être respectée que partiellement, du mieux possible, avec le plus petit débit restitué compatible avec  $V$  et  $QMnat$ .

En pratique, le non respect éventuel de contraintes locales à la restitution concerne essentiellement des contraintes réglementaires. En principe, les contraintes physiques ne sont susceptibles d'être violées qu'en simulation en chronologie inverse puisque les simulations chronologiques reproduisent une réalité possible, dans laquelle le maintien du volume  $V$  entre 0 et  $V_{tot}$  est toujours rendu possible par les organes de prise et de restitution correctement dimensionnés (hors cataclysme non envisagé ici).

#### 4.4 REPARTITION DU STOCKAGE NET DANS PLUSIEURS RÉSERVOIRS POUR OBTENIR, DANS LE COURS D'EAU À UNE STATION SITUÉE À LEUR AVAL COMMUN, UN DÉBIT LE PLUS PROCHE POSSIBLE D'UNE VALEUR PRÉDÉFINIE

Dans tout ce paragraphe, on suppose qu'on désire obtenir un débit égal à un objectif  $QX_{obj}$  (ou le plus proche possible de  $QX_{obj}$ ) à une station dans un cours d'eau, grâce à la gestion appropriée de plusieurs réservoirs situés à l'amont et non disposés en série. Les objectifs de gestion consistant à obtenir un débit supérieur ou égal à  $QX_{obj}$  (soutien de débit) ou inférieur ou égal à  $QX_{obj}$  (laminage de débit) sont abordés plus loin, à partir du paragraphe 4.6.

Pour obtenir un débit égal à  $QX_{obj}$  à la station aval, il faut soustraire à son débit naturel  $QX_{nat}$ , par stockage net dans les  $K$  réservoirs concernés, un débit  $QX_{sous}$  positif ou négatif vérifiant :

$$QX_{sous} = QX_{nat} - QX_{obj} \quad [36]$$

La méthode proposée ici consiste à réaliser du mieux possible ce stockage net global  $QX_{sous}$  en le répartissant dans les différents réservoirs (selon plusieurs modes présentés plus bas), en respectant de façon absolue les limites imposées par les contraintes et consignes locales sur le débit stocké net dans chacun d'entre eux (relations 35), et en tenant compte des temps de propagation d'écoulement entre leurs points de restitution et le lieu de l'objectif.

Ainsi, pour qu'un débit le plus proche possible de  $QX_{obj}$  soit obtenu 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  $D$ , vérifie du mieux possible la relation suivante, où  $i$  représente le rang des réservoirs :

$$\sum QST_i(T-D_i) = QX_{sous}(T) \quad [37]$$

Selon les cas, les contraintes physiques et consignes locales des différents réservoirs, qui prévalent sur l'objectif de gestion commun défini à l'aval, permettent ou non d'obtenir exactement le débit  $QX_{obj}$  à l'aval :

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

Ceci se produit quand l'inégalité suivante est vérifiée :

$$QX_{sous}(T) < \sum QST_{min3}(T-D_i) \quad [38]$$

Dans ce cas, le débit obtenu à la station aval est forcément inférieur à l'objectif  $QXobj$  (la relation 37 ne peut être vérifiée), et sa valeur la plus proche possible de  $QXobj$  est obtenue avec le débit stocké suivant dans chaque réservoir :

$$QST_i(T-D_i) = QSTmin3_i(T-D_i) \quad [39]$$

**2<sup>ème</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 :

$$QXsous(T) > \sum QSTmax3_i(T-D_i) \quad [40]$$

Dans ce cas, le débit obtenu à la station aval est forcément supérieur à l'objectif  $QXobj$  (la relation 37 ne peut être vérifiée), et sa valeur la plus proche possible de  $QXobj$  est obtenue avec le débit stocké suivant dans chaque réservoir :

$$QST_i(T-D_i) = QSTmax3_i(T-D_i) \quad [41]$$

**3<sup>ème</sup> 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 :

$$\sum QSTmin3_i(T-D_i) \leq QXsous(T) \leq \sum QSTmax3_i(T-D_i) \quad [42]$$

Il est alors possible d'obtenir un débit strictement égal à l'objectif  $QXobj$  à la station aval au temps  $T$  (la relation 37 est vérifiée), avec des débits stockés vérifiant les principes suivants :

- si  $QXsous(T)$  est égal à  $\sum QSTmin3_i(T-D_i)$ , ce qui correspond à un cas forcément très rare, alors le débit  $QST$  stocké vérifie la relation 39 dans chaque réservoir ;
- Si  $QXsous(T)$  est égal à  $\sum QSTmax3_i(T-D_i)$ , ce qui correspond aussi à un cas très rare, alors le débit  $QST$  stocké vérifie la relation 41 dans chaque réservoir ;
- Si  $QXsous(T)$  est supérieur à  $\sum QSTmin3_i(T-D_i)$  et inférieur à  $\sum QSTmax3_i(T-D_i)$ , alors le débit  $QXobj$  est obtenu à la station aval avec des débits stockés  $QST_i(T-D_i)$  différents à la fois de  $QSTmin3_i(T-D_i)$  et de  $QSTmax3_i(T-D_i)$  sur au moins un des réservoirs. Si, de plus, plusieurs réservoirs sont concernés, il existe alors plusieurs façons de répartir l'objectif de débit stocké  $QXsous$  entre les réservoirs. Plusieurs modalités sont proposées ci-dessous pour faire cette répartition.

#### **4.4.1 Modalités de répartition théorique de l'objectif de débit stocké entre les réservoirs, quand les contraintes et consignes locales des ouvrages laissent la possibilité d'obtenir exactement le débit visé à l'aval**

Quand les contraintes physiques et consignes locales des réservoirs ne permettent pas d'obtenir un débit égal à  $QXobj$  à la station aval (l'une des deux relations 42 n'étant pas vérifiée), ce sont les relations 39 ou 41 qui déterminent de façon triviale les débits stockés  $QST_i(T-D_i)$  permettant d'obtenir un débit le plus proche possible de  $QXobj(T)$  à la station aval.

Quand l'obtention d'un débit  $QX_{obj}$  à la station aval est compatible avec les contraintes physiques et consignes locales des réservoirs (relations 42 vérifiées), les débits stockés  $QST$  peuvent être déterminés suivant différents modes de répartition du débit stocké global  $QX_{sous}$ , dont cinq sont décrits ci-dessous.

#### 4.4.1.1 Mode 1 : répartition figée

Ce mode de répartition consiste à assigner à chaque réservoir de rang  $i$  une portion fixe théorique  $Part_i$  de l'objectif de débit stocké  $QX_{sous}$ , comprise entre 0 et 1 et dont la somme sur les réservoirs vaut 1. Cette portion est définie ainsi, à partir de valeurs fictives  $VR_{tot}$  du volume total exploitable des différents réservoirs :

$$Part_i = VR_{tot} / \sum VR_{tot_i} \quad [43]$$

Il suffit d'imposer à  $VR_{tot}$  la valeur réelle  $V_{tot}$  pour chaque réservoir, pour répartir entre les réservoirs l'objectif  $QX_{sous}$  de débit stocké au meilleur prorata possible de leurs volumes totaux exploitables respectifs. Une répartition différente peut être obtenue avec des valeurs fictives  $VR_{tot}$  différentes de  $V_{tot}$ , qu'il convient alors d'optimiser selon certains critères (voir § 6).

La règle adoptée consiste à stocker dans chaque réservoir le débit  $QST$  suivant, qui respecte les limites  $QST_{min3}$  et  $QST_{max3}$  imposées par les contraintes physiques et consignes locales (relations 35) :

$$QST_i(T-D) = \min(\max[QST_{0a}(T) \times Part_i ; QST_{min3_i}(T-D)] ; QST_{max3_i}(T-D)) \quad [44]$$

Dans cette relation,  $QST_{0a}(T)$  est un stockage net de débit dont la valeur, située entre  $\min(QST_{min3_i}(T-D) / Part_i)$  et  $\max(QST_{max3_i}(T-D) / Part_i)$ , est déterminée par encadrements successifs pour permettre l'obtention du débit  $QX_{obj}$  à la station aval (relation 37), qui se traduit par :

$$QX_{sous}(T) = \sum \min[\max(QST_{0a}(T) \times Part_i ; QST_{min3_i}(T-D)) ; QST_{max3_i}(T-D)] \quad [45]$$

Dans les cas très rares où  $QX_{sous}(T)$  est égal à  $\sum QST_{min3_i}(T-D)$  ou à  $\sum QST_{max3_i}(T-D)$ , la relation 44 utilisée avec les valeurs extrêmes de  $QST_{0a}$  donne un débit  $QST_i(T-D)$  égal respectivement à  $QST_{min3_i}(T-D)$  ou  $QST_{max3_i}(T-D)$  dans chaque réservoir, conformément à ce qui est énoncé plus haut.

Dans certains cas, il est possible de répartir l'objectif global  $QX_{sous}$  de débit stocké entre les réservoirs de façon parfaitement proportionnelle à leurs parts théoriques assignées  $Part$ . Ceci se produit quand les inégalités suivantes sont vérifiées pour chaque réservoir :

$$QST_{min3_i}(T-D) \leq QX_{sous}(T) \times Part_i \leq QST_{max3_i}(T-D) \quad [46]$$

Le débit  $QST_{0a}$  est alors égal à  $QX_{sous}(T)$  et le débit stocké dans chaque réservoir vaut :

$$QST_i(T-D) = QX_{sous}(T) \times Part_i \quad [47]$$

Mais dans tous les autres cas, la valeur de  $QST_{0a}$  diffère de  $QX_{sous}(T)$ . Une valeur supérieure à  $QX_{sous}(T)$  peut par exemple être nécessaire quand les contraintes et consignes locales de certains réservoirs y imposent au temps  $T-D_i$  un débit stocké égal à  $QST_{max3_i}(T-D)$  et inférieur à leur contribution théorique  $QX_{sous}(T) \times Part_i$ . Les autres réservoirs doivent alors assurer un stockage supérieur à leur contribution théorique pour que le débit  $QX_{obj}(T)$  soit exactement obtenu à la station aval du système.

**4.4.1.2 Mode 2 : répartition faite en fonction des volumes utilisables présents et des durées potentielles minimales d'obtention de volumes utilisables maximaux dans les différents réservoirs**

Comme pour le mode précédent, ce mode de répartition consiste à assigner à chaque réservoir de rang  $i$  une portion théorique  $Part_i$  de l'objectif de débit stocké  $QX_{sous}$ . Mais cette fois, les valeurs de  $Part_i$ , qui sont toujours comprises entre 0 et 1 et dont la somme vaut toujours 1, ne sont pas figées mais varient au contraire dans le temps en fonction de l'état de remplissage des réservoirs, en tenant compte de leurs contraintes locales aux prises et restitutions.

Dans chaque réservoir, les contraintes locales à la prise et à la restitution imposent au stockage net  $QST$  une limite minimale  $QST_{min0}$  négative et une limite maximale  $QST_{max0}$  positive, qu'on calcule ici dans l'hypothèse d'un débit du cours d'eau à l'amont immédiat de la prise égal à son module  $QM_{moy}$  (valeur moyenne interannuelle) :

$$QST_{min0} = \min(QM_{moy}; QE_{min}) - QS_{max} \quad [48]$$

$$QST_{max0} = \min(QM_{moy}; QE_{max}) - QS_{min} \quad [49]$$

Comme pour les modes de répartition suivants, l'obtention d'un débit le plus proche possible de  $QX_{obj}$  à la station aval est recherchée par une répartition équilibrée des tâches entre réservoirs, visant à retarder au maximum les situations suivantes dans lesquelles l'un des réservoirs ne peut plus contribuer à l'obtention du débit  $QX_{obj}$  à la station aval :

- réservoir vide pour un objectif de soutien de débit à la station aval, dans le cas d'un calcul en chronologie normale ;
- réservoir plein pour un objectif de soutien de débit à la station aval, dans le cas d'un calcul en chronologie inverse ;
- réservoir plein pour un objectif de laminage de débit à la station aval, dans le cas d'un calcul en chronologie normale ;
- réservoir vide pour un objectif de laminage de débit à la station aval, dans le cas d'un calcul en chronologie inverse ;

Selon ce principe, la règle adoptée consiste ici à solliciter prioritairement les réservoirs suivants :

- ceux qui disposent des plus forts volumes utilisables pour satisfaire l'objectif de gestion ;
- ceux où il serait possible de retrouver au plus vite le volume utilisable maximal, compte tenu des contraintes locales à la prise et à la restitution

Au début de pas de temps, le volume  $V_{ut}$  utilisable dans un réservoir pour satisfaire un objectif de gestion à l'aval correspond, selon la nature de cet objectif (soutien ou laminage de débit) et selon le sens des calculs (chronologique ou inverse), soit au volume d'eau disponible  $V$ , soit au volume de vide disponible  $V_{tot} - V$  :

$$V_{ut} = V(T - D - dT/2) \quad \text{pour soutien de débit en chronologie normale} \quad [50]$$

$$V_{ut} = V_{tot} - V(T - D + dT/2) \quad \text{pour soutien de débit en chronologie inverse} \quad [51]$$

$$V_{ut} = V_{tot} - V(T-D-dT/2) \quad \text{pour laminage de débit en chronologie normale} \quad [52]$$

$$V_{ut} = V(T-D+dT/2) \quad \text{pour laminage de débit en chronologie inverse} \quad [53]$$

Ainsi, compte tenu des contraintes physiques locales à la prise et à la restitution, et indépendamment de l'objectif aval, le temps minimal  $T_{pot}$  mis par le réservoir à partir du début de pas de temps ( $T-D-dT/2$  en chronologie normale et  $T-D+dT/2$  en chronologie inverse) pour retrouver un volume  $V$  optimal associé au volume utilisable  $V_{ut}$  maximal, est donné par les relations suivantes (figure 4.4.1.2) :

- pour un objectif de soutien de débit :

$$T_{pot}(T-D) = (V_{tot} - V(T-D-dT/2))/QST_{max0} \quad \text{en chronologie normale} \quad [54]$$

$$T_{pot}(T-D) = V(T-D+dT/2)/QST_{max0} \quad \text{en chronologie inverse} \quad [55]$$

- pour un objectif de laminage de débit :

$$T_{Pot}(T-D) = -V(T-D-dT/2)/QST_{min0} \quad \text{en chronologie normale} \quad [56]$$

$$T_{pot}(T-D) = (V(T-D+dT/2) - V_{tot})/QST_{min0} \quad \text{en chronologie binverse} \quad [57]$$

La part théorique de travail  $Part_i$  du réservoir de rang  $i$  est calculée en moyennant une part  $Partv_i$ , calculée en fonction du volume utile  $V_{ut}$  présent au début de pas de temps, et une part  $Partt_i$ , calculée en fonction du temps potentiel minimal  $T_{pot}$  de reconstitution du volume utile maximal.

Le calcul des parts  $Partv_i$ , et  $Partt_i$ , varie selon que les réservoirs sont sollicités de façon active ou passive pour satisfaire l'objectif de gestion aval :

- en cas de sollicitation active, c'est-à-dire quand l'obtention du débit objectif  $QX_{obj}$  à la station aval nécessite une diminution du volume utile global dans les réservoirs entre le début et la fin du pas de temps (si  $QX_{sous}$  est négatif pour un objectif de soutien d'étiage, ou si  $QX_{sous}$  est positif pour un objectif de laminage de crue), la part  $Partv_i$  est croissante en fonction de  $V_{ut}$  et la part  $Partt_i$  est décroissante en fonction de  $T_{pot}$  :

$$Partv_i(T-D_i) = V_{ut_i}/\sum V_{ut_i} \quad \text{si } \sum V_{ut_i} > 0 \quad [58]$$

$$Partv_i(T-D_i) = 1/K \quad \text{si } \sum V_{ut_i} = 0 \quad [59]$$

$$Partt_i(T-D_i) = (\sum T_{pot_i}(T-D_i) - T_{pot_i}(T-D_i))/([K-1] \times \sum T_{pot_i}(T-D_i)) \quad \text{si } \sum T_{pot_i} > 0 \quad [60]$$

$$Partt_i(T-D_i) = 1/K \quad \text{si } \sum T_{pot_i} = 0 \quad [61]$$

- en cas de sollicitation passive, c'est-à-dire quand l'obtention du débit  $QX_{obj}$  à la station aval nécessite une augmentation du volume utile global dans les réservoirs (si  $QX_{sous}$  est positif pour un objectif de soutien d'étiage, ou si  $QX_{sous}$  est négatif pour un objectif de laminage de crue), la part  $Partv_i$  est décroissante en fonction de  $V_{ut}$  et la part  $Partt_i$  est croissante en fonction de  $T_{pot}$  :

$$Partv_i(T-D_i) = (\sum V_{ut_i} - V_{ut_i})/([K-1] \times \sum V_{ut_i}) \quad \text{si } \sum V_{ut_i} > 0 \quad [62]$$

$$Partv_i(T-D_i) = 1/K \quad \text{si } \sum V_{ut_i} = 0 \quad [63]$$

$$Partt_i(T-D_i) = Tpot_i(T-D_i) / \sum Tpot_i(T-D_i) \quad \text{si } \sum Tpot_i > 0 \quad [64]$$

$$Partt_i(T-D_i) = 1/K \quad \text{si } \sum Tpot_i = 0 \quad [65]$$

La part théorique de  $QX_{sous}$  attribuée à chaque réservoir est finalement donnée par :

$$Part_i(T-D_i) = (Partv_i + Partt_i) / 2 \quad [66]$$

Enfin, quels que soient le signe de  $QX_{sous}$  et la chronologie des calculs, les valeurs de  $Part$  sont utilisées pour calculer les débits à stocker dans les différents réservoirs à partir des relations 44 à 47, comme pour le mode de répartition figée.

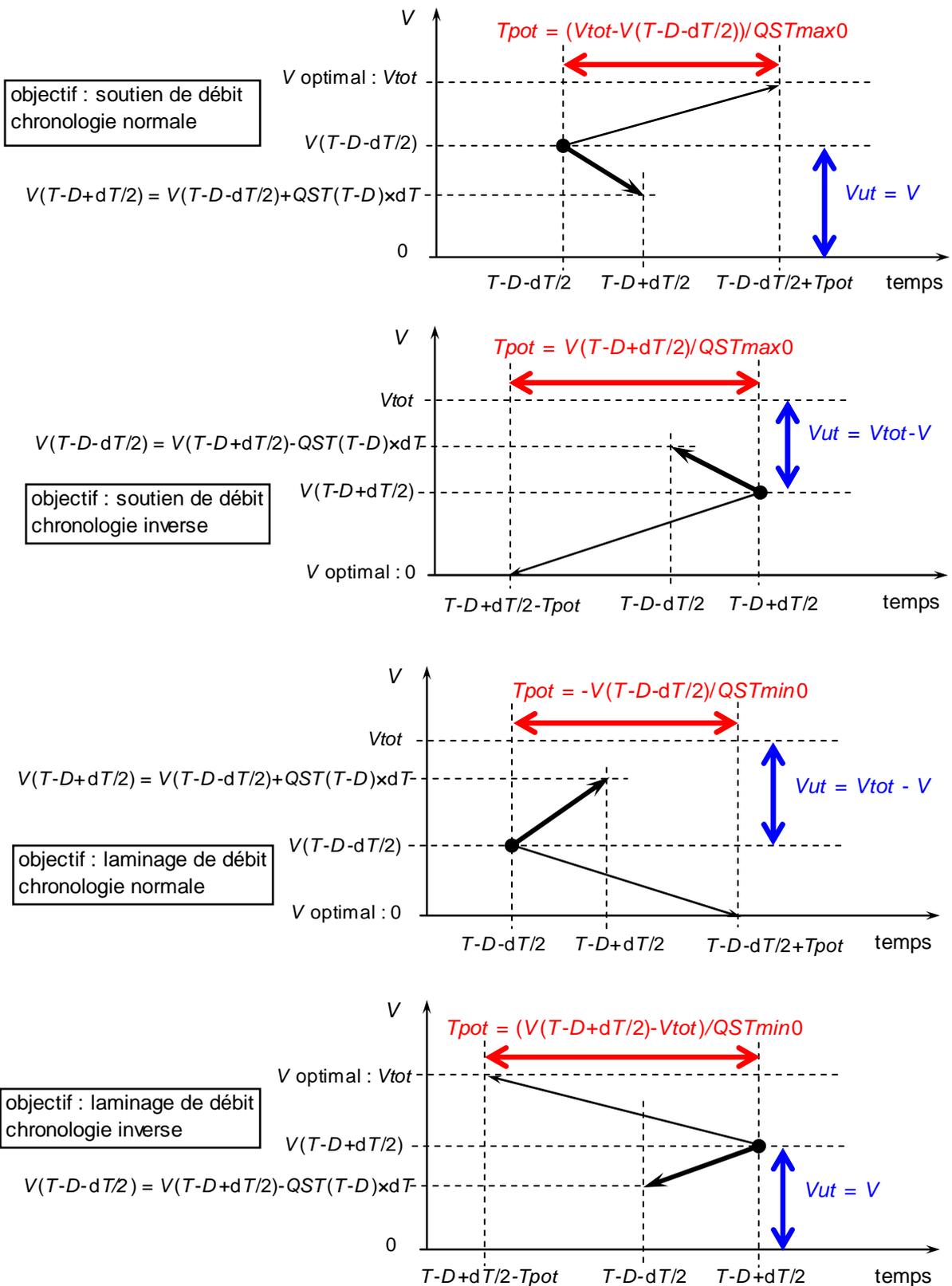


Figure 4.4.1.2 : évolution du volume  $V$  dans un réservoir, pour satisfaire l'objectif de gestion pendant un pas de temps (trait gras, représenté dans le cas d'une sollicitation active des réservoirs pour l'obtention de  $QX_{obj}$  à l'aval), ou pour retrouver au plus vite sa valeur optimale correspondant au volume utilisable maximal pour l'objectif (trait fin)

#### 4.4.1.3 Mode 3 : répartition visant à équilibrer les taux de remplissage des réservoirs

Cette fois, l'équilibre de répartition des tâches entre réservoirs est recherché en assignant à chacun d'entre eux, à chaque temps  $T$ , un débit stocké net théorique  $QST_{pot}$  positif ou négatif tel que :

- la somme des débits  $QST_{pot}$  sur les différents réservoirs est égale à  $QX_{sous}$  ;
- à la fin du pas de temps (au temps  $T-D+dT/2$  en sens chronologique ; au temps  $T-D-dT/2$  en sens chronologique inverse) le taux de remplissage  $V/V_{tot}$  est identique pour tous les réservoirs.

Ce débit  $QST_{pot}$  s'exprime ainsi au temps  $T$  pour chaque réservoir de rang  $i$ , en fonction des volumes d'eau présents au début de pas de temps :

- en chronologie normale :

$$QST_{pot_i}(T-D_i) = [V_{tot_i} \times (\sum V_i(T-D_i-dT/2) + QX_{sous}(T) \times dT) / \sum V_{tot_i} - V_i(T-D_i-dT/2)] / dT \quad [67]$$

- en chronologie inverse :

$$QST_{pot_i}(T-D_i) = -[V_{tot_i} \times (\sum V_i(T-D_i+dT/2) - QX_{sous}(T) \times dT) / \sum V_{tot_i} - V_i(T-D_i+dT/2)] / dT \quad [68]$$

La règle adoptée consiste à stocker dans chaque réservoir de rang  $i$  le débit suivant, qui respecte les limites  $QST_{min3}$  et  $QST_{max3}$  imposées par les contraintes et consignes locales et par l'état de remplissage (relations 35) :

$$QST_i(T-D_i) = \min[\max(QST_{0b}(T) + QST_{pot_i}(T-D_i) ; QST_{min3_i}(T-D_i)) ; QST_{max3_i}(T-D_i)] \quad [69]$$

Dans cette relation,  $QST_{0b}$  est un décalage de stockage net de débit dont la valeur, comprise entre  $\min(QST_{min3_i}(T-D_i) - QST_{pot_i}(T-D_i))$  et  $\max(QST_{max3_i}(T-D_i) - QST_{pot_i}(T-D_i))$ , est déterminée par encadrements successifs pour permettre l'obtention d'un débit  $QX_{obj}$  à la station aval (relation 37), ce qui se traduit par :

$$QX_{sous}(T) = \sum \min[\max(QST_{0b}(T) + QST_{pot_i}(T-D_i) ; QST_{min3_i}(T-D_i)) ; QST_{max3_i}(T-D_i)] \quad [70]$$

Dans les cas très rares où  $QX_{sous}(T)$  est égal à  $\sum QST_{min3_i}(T-D_i)$  ou à  $\sum QST_{max3_i}(T-D_i)$ , la relation 69 utilisée avec les valeurs extrêmes de  $QST_{0b}$  donne un débit  $QST_i(T-D_i)$  égal respectivement à  $QST_{min3_i}(T-D_i)$  ou  $QST_{max3_i}(T-D_i)$  dans chaque réservoir, conformément à ce qui est énoncé plus haut.

Dans certains cas, il est possible de répartir l'objectif de débit stocké entre les réservoirs en respectant précisément la valeur de débit stocké net théorique  $QST_{pot}$  assignée à chacun d'entre eux. Ceci se produit quand les inégalités suivantes sont vérifiées pour chaque réservoir :

$$QST_{min3_i}(T-D_i) \leq QST_{pot_i}(T-D_i) \leq QST_{max3_i}(T-D_i) \quad [71]$$

Le débit  $QST_{0b}$  est alors nul et le débit stocké dans chaque réservoir vaut :

$$QST_i(T-D_i) = QST_{pot_i}(T-D_i) \quad [72]$$

Mais dans tous les autres cas, la valeur de  $QST_{0b}$  est non nulle. Une valeur négative peut par exemple être nécessaire quand les contraintes et consignes locales de certains

réservoirs y imposent au temps  $T-D_i$  un débit stocké égal à  $QST_{min3_i}(T-D_i)$  et supérieur à leur débit stocké théorique  $QST_{pot_i}(T-D_i)$ . Les autres réservoirs doivent alors assurer un stockage inférieur à leur débit stocké théorique pour permettre l'obtention du débit  $QX_{obj}(T)$  à la station aval du système.

On notera qu'avec ce mode de répartition, comme pour les suivants et contrairement aux précédents, le débit stocké  $QST_i(T-D_i)$  dans chaque réservoir n'est pas obligatoirement de même signe que l'objectif  $QX_{sous}(T)$  de débit stocké aval. Cela signifie qu'on peut rechercher la meilleure satisfaction de l'objectif aval, par une gestion appropriée des différents réservoirs pouvant inclure une contribution négative de certains d'entre eux si c'est nécessaire pour rééquilibrer les différents taux de remplissage.

**4.4.1.4 Mode 4 : répartition visant à équilibrer entre les réservoirs, soit les durées potentielles minimales de reconstitution du volume utilisable maximal, soit les durées potentielles minimales d'épuisement du volume utilisable, calculées pour des écoulements naturels conformes aux modules dans les cours d'eau**

Ce mode de répartition, pour lequel deux options sont envisagées, vise à produire le débit  $QX_{obj}$  à la station aval en sollicitant prioritairement (c.à.d. avec une plus forte diminution ou une moindre augmentation du volume utilisable  $V_{ut}$ ) les réservoirs suivants :

- (première option) les réservoirs où une reconstitution du volume utilisable maximal est potentiellement la plus rapide,
- (deuxième option) les réservoirs où un épuisement du volume utilisable est potentiellement le plus lent

L'obtention d'un débit le plus proche possible de  $QX_{obj}$  dans le cours d'eau à la station aval au temps  $T$  impose pour chaque réservoir de rang  $i$  les relations suivantes, qui donnent les volumes d'eau présents finaux en fonction des volumes présents initiaux pour le pas de temps centré sur le temps  $T-D_i$  :

- en sens chronologique :

$$\sum V_i(T-D_i+dT/2) = \min[\sum V_{tot_i} ; \max(0 ; QX_{sous}(T) \times dT + \sum V_i(T-D_i-dT/2))] \quad [73]$$

$$\text{Si } \sum V_i(T-D_i+dT/2) = 0 \quad \text{alors } V_i(T-D_i+dT/2) = 0 \quad \text{pour chaque réservoir} \quad [74]$$

$$\text{Si } \sum V_i(T-D_i+dT/2) = \sum V_{tot_i} \quad \text{alors } V_i(T-D_i+dT/2) = V_{tot_i} \quad \text{pour chaque réservoir} \quad [75]$$

- en sens chronologique inverse :

$$\sum V_i(T-D_i-dT/2) = \min[\sum V_{tot_i} ; \max(0 ; -QX_{sous}(T) \times dT + \sum V_i(T-D_i+dT/2))] \quad [76]$$

$$\text{Si } \sum V_i(T-D_i-dT/2) = 0 \quad \text{alors } V_i(T-D_i-dT/2) = 0 \quad \text{pour chaque réservoir} \quad [77]$$

$$\text{Si } \sum V_i(T-D_i-dT/2) = \sum V_{tot_i} \quad \text{alors } V_i(T-D_i-dT/2) = V_{tot_i} \quad \text{pour chaque réservoir} \quad [78]$$

Les cas triviaux, où l'objectif aval impose à la somme des volumes  $V$  une valeur nulle ou égale à  $\sum V_{tot_i}$  en fin de pas de temps, sont forcément très rares puisqu'on suppose ici (comme pour les autres modes de répartition) que les relations 42 sont vérifiées. Ces cas sont résolus avec les relations 74, 75, 77 et 78, et n'appellent pas d'autres traitements.

Dans les autres cas (quand la somme des volumes  $V$  imposée en fin de pas de temps par l'objectif aval n'est ni nulle ni égale à  $\sum Vtot_i$ ), le mode de répartition proposé ici consiste à équilibrer du mieux possible, entre les réservoirs, la durée suivante (comptée à partir de la fin de pas de temps) calculée en tenant compte des contraintes physiques aux prises et restitutions, mais pas des consignes de gestion :

- soit (option 1) la durée potentielle minimale  $Tpot1$  de reconstitution du volume utilisable  $Vut$  maximal, ;
- soit (option 2) la durée potentielle minimale  $Tpot2$  d'épuisement du volume utilisable  $Vut$ .

Selon la logique illustrée sur la figure 4.4.1.4, les durées  $Tpot1$  et  $Tpot2$  dépendent pour chaque réservoir, à la fois de l'état de remplissage de celui-ci en fin de pas de temps et des débits stockés extrêmes permis par les contraintes locales à la prise et à la restitution. Ici, les valeurs  $QSTmin0$  et  $QSTmax0$  de ces débits stockés extrêmes sont calculées par les relations 48 et 49 (avec les valeurs de  $QSmin$ ,  $QSmax$ ,  $QEmin$  et  $QEmax$  correspondant à l'état des réservoirs au début du pas de temps), dans l'hypothèse où le débit du cours d'eau à l'amont immédiat de chaque prise est constant et égal à sa valeur moyenne interannuelle  $QMmoy$ . Les relations ci-dessous (dans lesquelles  $\sum V_i(T-D_i+dT)$  et  $\sum V_i(T-D_i-dT)$  sont connus grâce aux relations 73 et 76) donnent pour chaque réservoir l'objectif théorique  $VPOT$  de volume  $V$  en fin de pas de temps et la durée équilibrée  $Tpot1$  ou  $Tpot2$  associée :

- **pour l'option 1** visant à équilibrer les durées potentielles minimales  $Tpot1$  de reconstitution de volume utilisable maximal :

- pour un objectif de soutien de débit, en sens chronologique ( $Vut = V$ ) :

$$VPOT_i(T-D_i+dT/2) = Vtot_i - (\sum Vtot_i - \sum V_i(T-D_i+dT/2)) \times QSTmax0_i / \sum QSTmax0_i \quad [79]$$

$$Tpot1_i(T-D_i+dT/2) = (Vtot_i - VPOT_i(T-D_i+dT/2)) / QSTmax0_i = (\sum Vtot_i - \sum V_i(T-D_i+dT/2)) / \sum QSTmax0_i \quad [80]$$

- pour un objectif de soutien de débit, en chronologie inverse ( $Vut = Vtot - V$ ) :

$$VPOT_i(T-D_i-dT/2) = (\sum V_i(T-D_i-dT/2)) \times QSTmax0_i / \sum QSTmax0_i \quad [81]$$

$$Tpot1_i(T-D_i-dT/2) = VPOT_i(T-D_i-dT/2) / QSTmax0_i = \sum V_i(T-D_i-dT/2) / \sum QSTmax0_i \quad [82]$$

- pour un objectif de laminage de débit, en sens chronologique ( $Vut = Vtot - V$ ) :

$$VPOT_i(T-D_i+dT/2) = (\sum V_i(T-D_i+dT/2)) \times QSTmin0_i / \sum QSTmin0_i \quad [83]$$

$$TPot1_i(T-D_i+dT/2) = -VPOT_i(T-D_i+dT/2) / QSTmin0_i = -\sum V_i(T-D_i+dT/2) / \sum QSTmin0_i \quad [84]$$

- pour un objectif de laminage de débit, en chronologie inverse ( $Vut = V$ ) :

$$VPOT_i(T-D_i-dT/2) = Vtot_i - (\sum Vtot_i - \sum V_i(T-D_i-dT/2)) \times QSTmin0_i / \sum QSTmin0_i \quad [85]$$

$$Tpot1_i(T-D_i-dT/2) = (VPOT_i(T-D_i-dT/2) - Vtot_i) / QSTmin0_i = (\sum V_i(T-D_i-dT/2) - \sum Vtot_i) / \sum QSTmin0_i \quad [86]$$

- **pour l'option 2** visant à équilibrer les durées potentielles  $Tpot2$  d'épuisement du volume utilisable :

- pour un objectif de soutien de débit, en sens chronologique ( $Vut = V$ ) :

$$VPOT_i(T-D_i+dT/2) = (\sum V_i(T-D_i+dT/2)) \times QSTmin0_i / \sum QSTmin0_i \quad [87]$$

$$Tpot2_i(T-D_i+dT/2) = -VPOT_i(T-D_i+dT/2) / QSTmin0_i = -\sum V_i(T-D_i+dT/2) / \sum QSTmin0_i \quad [88]$$

- pour un objectif de soutien de débit, en chronologie inverse ( $V_{ut} = V_{tot} - V$ ) :

$$VPOT_i(T-D_i-dT/2) = V_{tot}_i - (\sum V_{tot}_i - \sum V_i(T-D_i-dT/2)) \times QSTmin0_i / \sum QSTmin0_i \quad [89]$$

$$Tpot2_i(T-D_i-dT/2) = (VPOT_i(T-D_i-dT/2) - V_{tot}_i) / QSTmin0_i = (\sum V_i(T-D_i-dT/2) - \sum V_{tot}_i) / \sum QSTmin0_i \quad [90]$$

- pour un objectif de laminage de débit, en sens chronologique ( $V_{ut} = V_{tot} - V$ ) :

$$VPOT_i(T-D_i+dT/2) = V_{tot}_i - (\sum V_{tot}_i - \sum V_i(T-D_i+dT/2)) \times QSTmax0_i / \sum QSTmax0_i \quad [91]$$

$$Tpot2_i(T-D_i+dT/2) = (V_{tot}_i - VPOT_i(T-D_i+dT/2)) / QSTmax0_i = (\sum V_{tot}_i - \sum V_i(T-D_i+dT/2)) / \sum QSTmax0_i \quad [92]$$

- pour un objectif de laminage de débit, en chronologie inverse ( $V_{ut} = V$ ):

$$VPOT_i(T-D_i-dT/2) = (\sum V_i(T-D_i-dT/2)) \times QSTmax0_i / \sum QSTmax0_i \quad [93]$$

$$Tpot2_i(T-D_i-dT/2) = VPOT_i(T-D_i-dT/2) / QSTmax0_i = \sum V_i(T-D_i-dT/2) / \sum QSTmax0_i \quad [94]$$

Dans chaque réservoir, le débit stocké théorique  $QST_{pot}$  au temps  $T-D$  donnant l'équilibre recherché est calculé à partir du volume présent au début du pas de temps ( $V(T-dT/2)$  en sens chronologique ;  $V(T+dT/2)$  en chronologie inverse) et de l'objectif théorique de volume à la fin du pas de temps ( $VPOT(T+dT/2)$  en sens chronologique ;  $VPOT(T-dT/2)$  en chronologie inverse), donné par la relation 79, 81, 83, 85, 87, 89, 91 ou 93 :

- en sens chronologique :

$$QST_{pot}(T-D) = (VPOT(T-D+dT/2) - V(T-D-dT/2)) / dT \quad [95]$$

- en sens chronologie inverse :

$$QST_{pot}(T-D) = (V(T-D+dT/2) - VPOT(T-D-dT/2)) / dT \quad [96]$$

Les valeurs théoriques  $QST_{pot}$  de débit stocké sont enfin utilisées pour calculer les débits  $QST$  à stocker dans les différents réservoirs à partir des relations 69 à 72, comme pour le mode de répartition précédent.

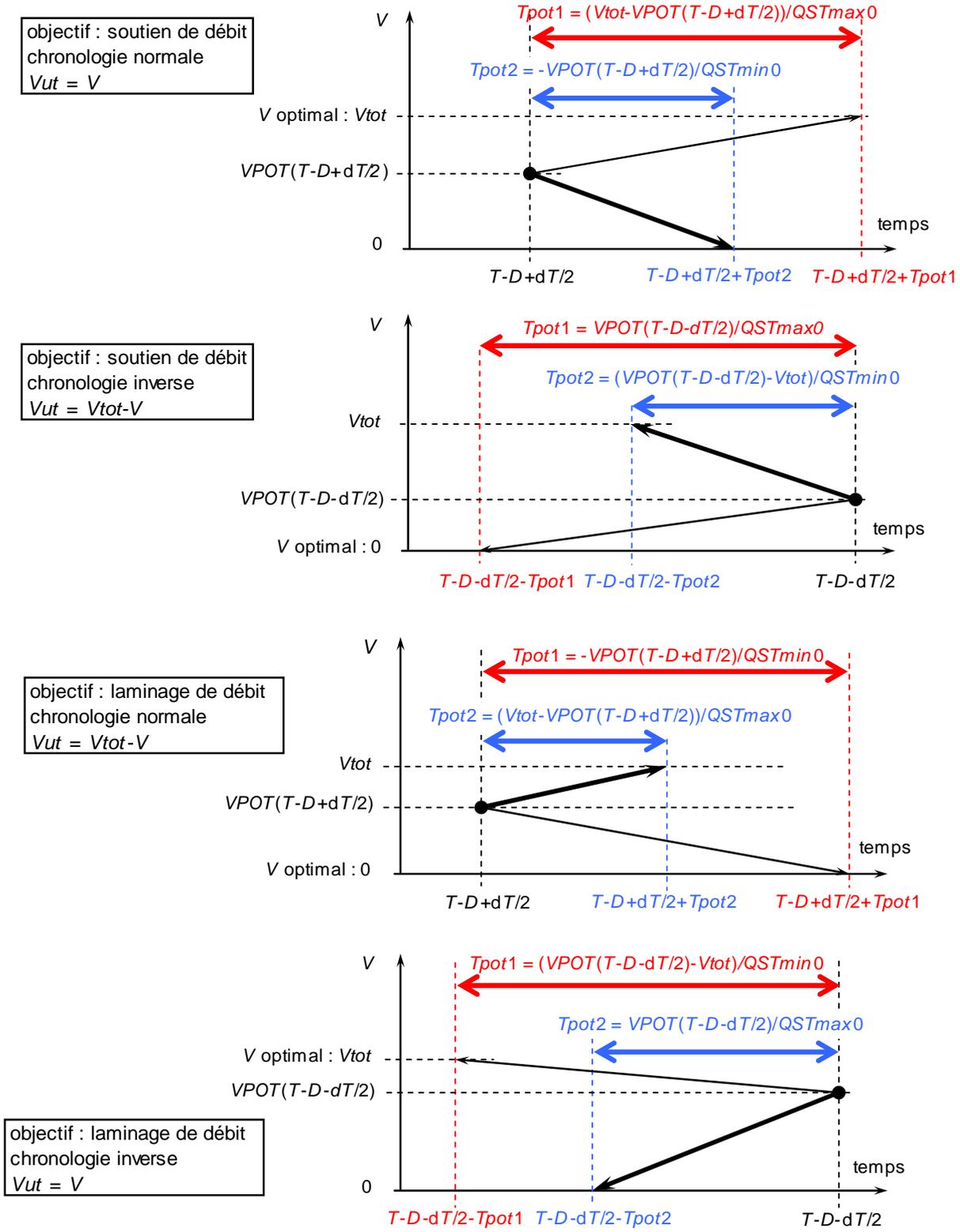


Figure 4.4.1.4 : évolution la plus rapide possible du volume  $V$  dans un réservoir à partir de sa valeur théorique  $VPOT$  en fin de pas de temps (au temps  $T-D+dT/2$  en chronologie normale ; au temps  $T-D-dT/2$  en chronologie inverse), pendant une durée  $T_{\text{pot1}}$  jusqu'à l'obtention du volume utilisable maximal (trait fin) et pendant une durée  $T_{\text{pot2}}$  jusqu'à l'obtention d'un volume utilisable nul (trait gras)

**4.4.1.5 Mode 5: répartition visant à équilibrer entre les réservoirs, soit les durées potentielles minimales de reconstitution du volume utilisable maximal, soit les durées potentielles minimales d'épuisement du volume utilisable, pour des écoulements naturels conformes à des hydrogrammes iso-fréquence dans les cours d'eau**

Ce mode de répartition des tâches entre réservoirs est très proche du précédent. Il n'en diffère qu'au niveau de l'hypothèse concernant les débits des cours d'eau à l'amont immédiat des prises, qui interviennent dans le calcul de la durée potentielle minimale  $T_{pot1}$  de reconstitution du volume utilisable  $V_{ut}$  maximal ou de la durée potentielle minimale  $T_{pot2}$  d'épuisement du volume utilisable, à partir de la fin de pas de temps. Au lieu d'être considéré constant et égal à sa moyenne interannuelle  $QM_{moy}$ , chacun de ces débits est supposé varier dans le temps en suivant un hydrogramme iso-fréquence, calculé pour une fréquence pré-choisie à partir des valeurs observées à la station.

A chaque pas de temps, les relations 73 à 78 continuent à s'appliquer. Si nécessaire, les relations 79 à 94 sont utilisées pour initialiser un calcul par itérations des valeurs théoriques  $VPOT$  de volume  $V$  en fin de pas de temps. A chaque itération, les valeurs  $VPOTa$  de  $VPOT$  produites par la précédente itération sont utilisées pour déterminer la durée  $T_{pot1}$  ou  $T_{pot2}$  résultante pour chaque réservoir, en calculant l'évolution du volume jusqu'à la valeur limite (0 ou  $V_{tot}$  selon les cas, cf. fig. 4.4.1.4). Pour les débits stockés extrêmes  $QSTmin0$  et  $QSTmax0$  permis par les contraintes locales aux prises et restitutions, ce calcul utilise (à la place des relations 48 et 49) les relations suivantes dans lesquelles  $QM$  évolue, à partir de la fin de pas de temps, en sens chronologique ou en chronologie inverse selon les cas, conformément à l'hydrogramme iso-fréquence pré-choisi du cours d'eau à la prise :

$$QSTmin0 = \min(QM ; QEmin) - QSmax \quad [97]$$

$$QSTmax0 = \min(QM ; QEmax) - QSmin \quad [98]$$

Dans ces relations, les valeurs de  $QSmin$ ,  $QSmax$ ,  $QEmin$  et  $QEmax$  sont celles qui correspondent à l'état des réservoirs au début du pas de temps.

Les volumes  $VPOTa$  et les durées  $T_{pot1}$  ou  $T_{pot2}$  obtenues pour les différents réservoirs sont ensuite utilisées pour calculer les nouvelles valeurs  $VPOTn$  de  $VPOT$  à utiliser pour l'itération suivante. Ces calculs utilisent les relations suivantes, dans lesquelles  $\sum V_i$  désigne la somme des volumes  $V$  imposée en fin de pas de temps par l'objectif aval (donnée par la relation 73 ou 76),  $X$  un coefficient de relaxation constant fixé à 0.9,  $Y$  un coefficient de relaxation initialisé à 0.9 et décroissant de 10% à chaque itération, et  $VPOTm$  le volume théorique en fin de pas de temps correspondant au meilleur jeu de valeurs produit par les itérations précédentes (c.à.d. celui qui donne la plus faible dispersion des durées  $T_{pot1}$  ou  $T_{pot2}$  entre les réservoirs) :

- Pour l'option 1 visant l'égalité entre réservoirs des durées minimales  $T_{pot1}$  de reconstitution de volume utile maximal :
  - si le volume  $V$  optimal vaut  $V_{tot}$  (pour un objectif de soutien de débit en sens chronologique, ou un objectif de laminage de débit en chronologie inverse) :

$$VPOTn_i = (1-Y) \times VPOTm_i + Y \times [(1-X) \times VPOTa_i + X \times \{V_{tot_i} - (\sum V_{tot_i} - \sum V_i) \times (V_{tot_i} - VPOTa_i) / (T_{pot1_i} \times \sum [(V_{tot_i} - VPOTa_i) / T_{pot1_i}])\}] \quad [99]$$

- si le volume  $V$  optimal est nul (pour un objectif de soutien de débit en sens chronologique inverse, ou un objectif de laminage de débit en sens chronologique) :

$$VPOTn_i = (1-Y) \times VPOTm_i + Y \times \left\{ (1-X) \times VPOTa_i + X \times \sum V_i \times VPOTa_i / [Tpot1_i \times \sum (VPOTa_i / Tpot1_i)] \right\} \quad [100]$$

- Pour l'option 2 visant l'égalité entre réservoirs des durées  $Tpot2$  d'épuisement de volume utile :
  - si le volume  $V$  optimal vaut  $Vtot$  (pour un objectif de soutien de débit en sens chronologique, ou un objectif de laminage de débit en chronologie inverse) :

$$VPOTn_i = (1-Y) \times VPOTm_i + Y \times \left\{ (1-X) \times VPOTa_i + X \times \sum V_i \times VPOTa_i / [Tpot2_i \times \sum (VPOTa_i / Tpot2_i)] \right\} \quad [101]$$

- si le volume  $V$  optimal est nul (pour un objectif de soutien de débit en chronologie inverse, ou un objectif de laminage de débit en sens chronologique) :

$$VPOTn_i = (1-Y) \times VPOTm_i + Y \times \left\{ (1-X) \times VPOTa_i + X \times \left[ Vtot_i - \left( \sum Vtot_i - \sum V_i \right) \times (Vtot_i - VPOTa_i) / \left( Tpot2_i \times \sum [(Vtot_i - VPOTa_i) / Tpot2_i] \right) \right] \right\} \quad [102]$$

Les itérations successives ont pour effet de produire des durées  $Tpot1$  ou  $Tpot2$  de moins en moins dispersées entre réservoirs. Le processus est arrêté quand les durées obtenues deviennent quasiment identiques pour les différents réservoirs.

Ainsi déterminées, les valeurs théoriques  $VPOT$  de volume  $V$  en fin de pas de temps sont ensuite utilisées pour calculer les débits stockés théoriques  $QSTpot$  par les relations 91 et 92. Ces derniers sont enfin utilisés pour calculer les débits  $QST$  à stocker dans les différents réservoirs à partir des relations 69 à 72, comme pour les deux modes de répartition précédents.

#### **4.5 DÉBIT IDÉAL PRIS, RESTITUÉ ET PRODUIT DANS LE COURS D'EAU À L'AVAL IMMÉDIAT DE LA RESTITUTION AUX DIFFÉRENTS RÉSERVOIRS POUR OBTENIR, DANS LE COURS D'EAU À UNE STATION SITUÉE À LEUR AVAL COMMUN, UN DÉBIT LE PLUS PROCHE POSSIBLE D'UN OBJECTIF PRÉDÉFINI**

Pour chaque réservoir, les valeurs idéales au temps  $T-D$  des débits  $QE$  (pris dans le cours d'eau et entrant dans le réservoir),  $QS$  (sortant du réservoir et restitué dans le cours d'eau) et  $QV$  (obtenu dans le cours d'eau à l'aval immédiat de la restitution du réservoir, sous l'influence de la gestion de celui-ci) permettant d'obtenir à la station aval un débit le plus proche possible de l'objectif  $QXobj$  au temps  $T$ , peuvent être calculées à partir du débit stocké  $QST$  déterminé ci-dessus. Ainsi, le débit  $QE$  doit respecter les relations 12 imposées par les contraintes physiques et consignes de gestion à la prise. Le débit  $QS$  doit quant à lui respecter les relations 15 imposées par les contraintes physiques à la restitution. Ces deux débits doivent également respecter la relation 21 imposée par le principe de conservation de volume. Les relations 15 et 21 donnent :

$$Q_{Smin} + Q_{ST} \leq QE \leq Q_{Smax} + Q_{ST} \quad [103]$$

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

$$\max(\min(QS_{min}+QST ; QEsup) ; QEinf) \leq QE \leq \min(\max(QS_{max}+QST ; QEinf); QEsup) \quad [104]$$

L'infériorité de  $QS_{min}$  par rapport à  $QS_{max}$ , celle de  $QEinf$  par rapport à  $QEsup$  et les relations 22 montrent que le système d'inéquations 104 a toujours au moins une solution  $QE$ . On retient finalement la valeur suivante pour le débit entrant idéal:

$$QE = \max(\min(QEsup ; QS_{min}+QST) ; QEinf) \quad [105]$$

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

$$QS = QE - QST \quad [106]$$

Les relations 104 et 106 permettent de vérifier que la valeur de  $QS$  ainsi obtenue vérifie bien les contraintes de débitance de la restitution (relation 15).

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

$$QV = QV_{nat} - QST \quad [107]$$

#### **4.6 DÉFAILLANCES DE SATISFACTION D'UN OBJECTIF DE GESTION DÉFINI PAR UN SEUIL MINIMAL OU MAXIMAL DE DÉBIT À RESPECTER DANS LE COURS D'EAU À UNE STATION SITUÉE EN AVAL DES RÉSERVOIRS**

On considère à partir d'ici des objectifs de gestion définis à la station aval sous forme d'un seuil  $QX_{obj}$  de débit qu'on souhaite voir toujours dépassé, au sens large, par le débit du cours d'eau (cas du soutien d'étiage), ou au contraire ne jamais voir dépassé, au sens large, par ce débit (cas du laminage de crue).

Comme on l'a vu plus haut, les contraintes physiques et consignes de gestion locales des réservoirs peuvent parfois rendre impossible l'obtention d'un débit strictement égal à  $QX_{obj}$  à la station aval. Parmi ces situations, certaines ne correspondent pas à des échecs mais au contraire à des dépassements de l'objectif (débit strictement supérieur à  $QX_{obj}$  pour un soutien d'étiage, ou strictement inférieur à  $QX_{obj}$  pour un laminage de crue). Les autres situations correspondent à des échecs, dont la gravité peut être évaluée sous forme d'une défaillance de débit égale à l'écart absolu du débit obtenu par rapport au seuil  $QX_{obj}$ .

Dans certains cas, les contraintes physiques et consignes de gestion aux prises et restitutions peuvent entraîner à elles seules de telles défaillances de débit, qu'on peut alors qualifier d'inévitables absolues car leur valeur  $QX_{def0}$  est indépendante des capacités des réservoirs et des volumes d'eau présents dans ceux-ci. Ce type de défaillance peut par exemple se rencontrer dans les cas suivants :

- impossibilité de satisfaire complètement un objectif de soutien d'étiage à l'aval, du fait de l'insuffisance des débits pouvant être restitués dans les cours d'eau (ou accessoirement de l'excès des débits devant y être pris). Différentes circonstances peuvent expliquer cette impossibilité :

- trop faible débitance maximale  $QS_{max}$  des restitutions. Les défaillances causées par ces contraintes physiques, très peu probables, ne peuvent survenir que si  $\sum QS_{max_i}$  est inférieure à  $QX_{obj}$ , en période de faibles écoulements naturels et si les bassins versants contrôlés par les réservoirs représentent une part importante du bassin contrôlé par la station aval ;
- trop forte débitance minimale  $QE_{min}$  des prises ou trop faibles débits de référence  $QM_{ref}$  à la prise ou  $QV_{ref}$  à la restitution. Les défaillances causées par ces contraintes physiques et consignes locales sont théoriquement possibles, mais n'ont quasiment aucune chance d'être observées en pratique
- impossibilité de satisfaire complètement un objectif de laminage de crue à l'aval, du fait de l'insuffisance des débits pouvant être pris dans les cours d'eau (ou accessoirement de l'excès des débits devant y être restitués). Différentes raisons peuvent expliquer cette impossibilité :
  - trop faibles débits  $QM_{nat}$  dans les cours d'eau contrôlés par les réservoirs, la crue à laminar provenant en trop grande partie d'affluents non contrôlés. Ces contraintes physiques peuvent être à l'origine de défaillances très importantes, particulièrement si les bassins versants contrôlés par les réservoirs sont petits par rapport au bassin contrôlé par la station aval ;
  - trop faible débitance maximale  $QE_{max}$  des prises. Ces contraintes physiques peuvent également causer des défaillances importantes ;
  - trop forts débits réservés  $QV_{res}$  à l'aval immédiat des prises ou des restitutions. A priori, ces consignes de gestion ne peuvent entraîner que des défaillances relativement faibles et peu probables en pratique ;
  - trop forte débitance minimale  $QS_{min}$  des restitutions. Ces contraintes physiques, correspondant à des cas particuliers peu fréquents ( $QS_{min}$  est généralement nul), peuvent théoriquement entraîner de très faibles défaillances, qui n'ont pratiquement aucune chance d'être observées en pratique.

Les volumes d'eau présents dans les réservoirs et les capacités de ceux-ci peuvent également être incompatibles avec la satisfaction de l'objectif aval dans certaines situations. Ainsi, les défaillances totales  $QX_{def1}$  de satisfaction de l'objectif aval sont la somme des défaillances inévitables absolues  $QX_{def0}$  détaillées plus haut et de défaillances supplémentaires  $QX_{def2}$ , éventuellement non nulles, causées par les volumes d'eau présents et les capacités des réservoirs. Ces volumes et capacités peuvent entraîner à eux-seuls des défaillances supérieures à  $QX_{def2}$ , mais on ne s'intéresse bien ici qu'aux suppléments de défaillance qu'ils entraînent par rapport à  $QX_{def0}$ . Ces défaillances supplémentaires  $QX_{def2}$ , qui diffèrent selon le sens des calculs (chronologique ou chronologique inverse) et peuvent varier selon le mode de gestion adopté (répartition des tâches entre réservoirs), peuvent être considérés selon les cas comme inévitables ou non.

Les défaillances  $QX_{def2}$  inévitables sont celles qui ne pourraient être évitées qu'avec une plus grande capacité  $V_{tot}$  des réservoirs. Elles peuvent survenir quand le débit stocké  $QX_{sous}$  nécessaire pour satisfaire l'objectif aval est incompatible avec le volume d'eau global présent dans les réservoirs, quelle que soit la répartition de celui-ci. Cela peut être le cas, pour des calculs menés dans le sens chronologique, si le volume vide global présent est insuffisant pour satisfaire un objectif de laminage de crue ( $\sum (V_{tot} - V(T - D_i)) < dT \times QX_{sous}(T)$ )

ou si le volume d'eau global présent est insuffisant pour satisfaire un objectif de soutien d'étiage ( $\sum V(T-D_i) < -dT \times QX_{sous}(T)$ ).

Les défaillances  $QX_{def2}$  évitables sont celles qui pourraient être évitées par une répartition différente du volume d'eau présent dans les réservoirs, sans augmentation nécessaire de leur capacité. Elles peuvent survenir quand le débit stocké  $QX_{sous}$  nécessaire est compatible avec le volume d'eau global présent dans les réservoirs, mais impossible à réaliser à cause de la mauvaise répartition de ce volume. Cela peut être le cas, toujours pour des calculs menés dans le sens chronologique, quand une crue est très inégalement répartie sur les cours d'eau contrôlés par les réservoirs : malgré un volume vide globalement suffisant ( $\sum (V_{tot} - V(T-D_i)) \geq dT \times QX_{sous}(T)$ ), l'objectif aval de laminage de crue ne peut être atteint si l'essentiel de la crue se produit sur un cours d'eau contrôlé par un réservoir déjà trop rempli.

Pour résumer, la meilleure satisfaction possible de l'objectif aval ne peut parfois éviter certaines défaillances totales  $QX_{def1}$ , correspondant au manque ou excès de débit obtenu dans le cours d'eau à la station aval par rapport à l'objectif  $QX_{obj}$ . Ces défaillances totales  $QX_{def1}$  sont la somme de :

- $QX_{def0}$  : défaillances inévitables absolues dues aux contraintes physiques et consignes aux prises et restitutions, indépendantes des volumes d'eau présents et des capacités des réservoirs, ainsi que du mode de gestion concertée des réservoirs ;
- $QX_{def2}$  : défaillances supplémentaires, dont une partie inévitable, due au manque global de capacité des réservoirs, est indépendante du mode de gestion, alors que l'autre partie, théoriquement évitable, est liée à la répartition du volume d'eau présent entre réservoirs et dépend du mode de gestion adopté.

En fonction des limites  $QST_{min1}$ ,  $QST_{max1}$ ,  $QST_{min3}$  et  $QST_{max3}$  imposées sur les débits stockés nets dans les réservoirs et données par les relations 25, 26, 33 et 34, les défaillances de débit  $QX_{def0}$  et  $QX_{def1}$  sont données par les relations suivantes :

- pour un objectif de soutien d'étiage (débit objectif  $QX_{obj}$  à dépasser à la station aval) :

$$QX_{def1}(T) = \max(0 ; \sum QST_{min3,i}(T-D_i) - QX_{sous}(T)) \quad [108]$$

$$QX_{def0}(T) = \max(0 ; \sum QST_{min1,i}(T-D_i) - QX_{sous}(T)) \quad [109]$$

- pour un objectif de laminage de crue (débit objectif  $QX_{obj}$  à ne pas dépasser à la station aval) :

$$QX_{def1}(T) = \max(0 ; QX_{sous}(T) - \sum QST_{max3,i}(T-D_i)) \quad [110]$$

$$QX_{def0}(T) = \max(0 ; QX_{sous}(T) - \sum QST_{max1,i}(T-D_i)) \quad [111]$$

Dans tous les cas, la défaillance de débit  $QX_{def2}$  est donnée par :

$$QX_{def2}(T) = QX_{def1}(T) - QX_{def0}(T) \quad [112]$$

## 4.7 EVOLUTION DES VOLUMES D'EAU PRÉSENTS DANS LES RÉSERVOIRS, LIÉE À LA MEILLEURE SATISFACTION POSSIBLE D'UN OBJECTIF DE GESTION DÉFINI À L'AVAL (SEUIL DE DÉBIT À DÉPASSER OU NE PAS DÉPASSER DANS LE COURS D'EAU)

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 soutien d'étiage, l'hydrogramme correspond à un débit minimal  $QXobj$  qu'on souhaite voir toujours atteint ou dépassé à la station aval. Dans le cas d'un objectif de laminage de crue, l'hydrogramme correspond au contraire à un débit maximal  $QXobj$  qu'on souhaite ne jamais voir dépassé à cette station.

La meilleure satisfaction possible de cet objectif de gestion au temps  $T$  à la station aval s'exprime ainsi avec le volume  $V_i$  (volume d'eau présent) et le débit  $QST_i$  (débit stocké net produisant un débit le plus proche possible du seuil  $QXobj$  dans le cours d'eau à la station aval), sur le pas de temps centré sur le temps  $T-D_i$  pour chaque réservoir de rang  $i$  :

- dans le cas d'un objectif de soutien d'étiage, le stockage net doit être inférieur ou égal à  $QST$  :

$$(V_i(T-D_i+dT/2)-V_i(T-D_i-dT/2))/dT \leq QST_i(T-D_i) \quad [113]$$

$$\Leftrightarrow V_i(T-D_i-dT/2) \geq V_i(T-D_i+dT/2)-dT \times QST_i(T-D_i) \quad [114]$$

$$\Leftrightarrow V_i(T-D_i+dT/2) \leq V_i(T-D_i-dT/2)+dT \times QST_i(T-D_i) \quad [115]$$

- dans le cas d'un objectif de laminage de crue, le stockage net doit être supérieur ou égal à  $QST$  :

$$(V_i(T-D_i+dT/2)-V_i(T-D_i-dT/2))/dT \geq QST_i(T-D_i) \quad [116]$$

$$\Leftrightarrow V_i(T-D_i-dT/2) \leq V_i(T-D_i+dT/2)-dT \times QST_i(T-D_i) \quad [117]$$

$$\Leftrightarrow V_i(T-D_i+dT/2) \geq V_i(T-D_i-dT/2)+dT \times QST_i(T-D_i) \quad [118]$$

### 4.7.1 Simulation en chronologie inverse : calcul des valeurs limites $Vobj$ de volume d'eau à respecter dans les réservoirs, condition minimale nécessaire pour permettre la meilleure satisfaction future possible de l'objectif aval

Pour un temps  $T$  décroissant de  $T_{fin}$  à  $T_{init}$ , on simule en chronologie inverse l'évolution d'un volume d'eau  $Vobj$  initialisé à  $Vobj(T_{fin}-D_i+dT/2)$  et vérifiant la relation suivante pour chaque réservoir de rang  $i$  :

$$Vobj_i(T-D_i-dT/2) = Vobj_i(T-D_i+dT/2)-dT \times QST_i(T-D_i) \quad [119]$$

Compte tenu des relations 114 et 117, la chronique  $Vobj$  ainsi calculée pour chaque réservoir reconstitue les valeurs extrêmes du volume d'eau présent dans celui-ci (minimales pour un objectif de soutien d'étiage ou maximales pour un objectif de laminage de crue),

compatibles à tout instant  $T-D_i-dT/2$  avec : 1) la meilleure satisfaction ultérieure possible de l'objectif aval, du temps  $T$  au temps  $T_{fin}$  ; 2) le volume initial imposé au temps  $T_{fin}-D_i+dT/2$ .

Afin que les séries  $Vobj$  obtenues ne soient influencées que de façon neutre par les valeurs initiales imposées  $Vobj(T_{fin}-D_i+dT/2)$ , on retient un jeu de valeurs initiales correspondant pour chaque réservoir à la médiane des volumes  $Vobj$  obtenus pour le même jour de l'année sur toute la période simulée. Le jeu de valeurs initiales vérifiant cette condition est déterminé par encadrements successifs, à partir d'un jeu initial arbitraire (pour chaque réservoir :  $V=0$  pour un objectif de soutien d'étiage, ou  $V=V_{tot}$  pour un objectif de laminage de crue).

Compte tenu des écoulements naturels sur la période simulée, des contraintes physiques et consignes locales des réservoirs et du principe adopté pour la répartition des tâches entre réservoirs, le volume  $Vobj$  correspond donc aux conditions minimales à respecter dans chaque réservoir pour permettre la meilleure satisfaction possible de l'objectif aval par la suite. Sa signification est la suivante, selon la nature de l'objectif aval :

- pour un objectif de soutien d'étiage,  $Vobj$  représente le plus petit volume d'eau  $V$  présent, qui soit compatible avec la meilleure satisfaction ultérieure possible de cet objectif par l'ensemble des réservoirs. Autrement dit, c'est le volume d'eau qu'il faut au moins avoir dans le réservoir, pour que l'objectif aval puisse être atteint du mieux possible par la suite (exemple : figure 4.7.A (a), limnigrammes bleus), avec des défaillances limitées à leurs valeurs  $QX_{def1}$  ;
- pour un objectif de laminage de crue,  $Vobj$  représente le plus grand volume d'eau  $V$  présent, qui soit compatible avec la meilleure satisfaction ultérieure possible de cet objectif par l'ensemble des réservoirs. Autrement dit, c'est le volume d'eau qu'il ne faut pas dépasser dans le réservoir, pour que l'objectif aval puisse être atteint du mieux possible par la suite (exemple : figure 4.7.B (a), limnigrammes bleus), avec des défaillances limitées à leurs valeurs  $QX_{def1}$ .

#### **4.7.2 Simulation en sens chronologique : calcul des valeurs $V_{ges}$ du volume d'eau présent, résultant d'une gestion opérationnelle visant, face à un avenir inconnu, d'abord à satisfaire l'objectif aval dans l'immédiat et ensuite à préserver au mieux les conditions optimales pour sa satisfaction future**

Pour un temps  $T$  croissant de  $T_{init}$  à  $T_{fin}$ , on simule dans le sens chronologique l'évolution d'un volume  $V_{ges}$  initialisé à  $V_{ges}(T_{init}-D_i-dT/2)$  et vérifiant la relation suivante pour chaque réservoir de rang  $i$  :

$$V_{ges}(T-D_i+dT/2) = V_{ges}(T-D_i-dT/2) + dT \times QST_i(T-D_i) \quad [120]$$

Compte tenu des relations 115 et 118, la chronique  $V_{ges}$  ainsi calculée pour chaque réservoir reconstitue les valeurs extrêmes du volume d'eau présent dans celui-ci (maximales pour un objectif de soutien d'étiage ou minimale pour un objectif de laminage de crue), résultant à tout instant  $T-D_i+dT/2$  de : 1) la meilleure satisfaction possible de l'objectif aval, du temps  $T_{init}$  au temps  $T$  ; 2) le volume initial imposé au temps  $T_{init}-D_i-dT/2$ .

Comme pour  $Vobj$  avec les simulations en sens chronologique inverse, on retient pour  $V_{ges}$  un jeu de valeurs initiales correspondant pour chaque réservoir à la médiane des valeurs obtenues pour le même jour de l'année sur toute la période simulée. Ce jeu de valeurs initiales est déterminé par encadrements successifs, à partir d'un jeu initial arbitraire (pour

chaque réservoir :  $V=V_{tot}$  pour un objectif de soutien d'étiage, ou  $V=0$  pour un objectif de laminage de crue).

Compte tenu des écoulements naturels sur la période simulée, des contraintes physiques et consignes locales des réservoirs et du principe adopté pour la répartition des tâches entre réservoirs,  $V_{ges}$  est le volume d'eau dans les réservoirs qui résulte d'une gestion opérationnelle préoccupée uniquement de l'objectif aval face à un avenir inconnu. Cette gestion vise en priorité à satisfaire du mieux possible l'objectif dans l'immédiat (à l'horizon des délais de propagation entre les réservoirs et la station aval), en influençant de façon adéquate le débit des cours d'eau contrôlés. Secondairement, elle se soucie de la satisfaction ultérieure de l'objectif, en maintenant un volume d'eau présent le plus éloigné possible du volume limite  $V_{obj}$  :

- pour un objectif de soutien d'étiage,  $V_{ges}$  est le plus grand volume d'eau dans les réservoirs pouvant résulter d'une gestion opérationnelle satisfaisant cet objectif du mieux possible ; après n'avoir prélevé que le minimum d'eau possible dans les réservoirs quand c'est nécessaire pour le soutien, on remplit ceux-ci au plus vite avant de les maintenir pleins aussi longtemps que possible (exemple : figure 4.7.A (a), limnigrammes mauves) ;
- pour un objectif de laminage de crue,  $V_{ges}$  est le plus petit volume d'eau dans les réservoirs pouvant résulter d'une gestion opérationnelle satisfaisant cet objectif du mieux possible ; après n'avoir emmagasiné que le minimum d'eau possible dans les réservoirs quand c'est nécessaire pour le laminage, on vide ceux-ci au plus vite avant de les maintenir vides aussi longtemps que possible (exemple : figure 4.7.B (a), limnigrammes mauves).

#### **4.7.3 Valeurs $V_{op}$ du volume d'eau présent dans les réservoir, produites par une gestion opérationnelle théorique visant, face à un avenir connu, d'abord à satisfaire l'objectif aval dans l'immédiat, ensuite à préserver au mieux les conditions minimales nécessaires pour sa satisfaction future et enfin à pénaliser le moins possible d'éventuels objectifs concurrentiels**

On envisage ici une gestion opérationnelle des réservoirs entraînant comme la précédente le moins possible de défaillances pour l'objectif aval, mais cette fois en pénalisant le moins possible d'autres objectifs. Cette gestion, qui est toute théorique du fait qu'elle envisage un avenir connu, vise les buts suivants, par priorité décroissante :

- la meilleure satisfaction possible de l'objectif aval dans l'immédiat (à l'horizon des temps de propagation), ce qui produit dans chaque réservoir un volume présent toujours inférieur ou égal à  $V_{ges}$  pour un objectif de soutien d'étiage, ou supérieur ou égal à  $V_{ges}$  pour un objectif de laminage de crue ;
- la meilleure satisfaction possible de l'objectif aval par la suite, ce qui nécessite dans chaque réservoir un volume présent supérieur ou égal à  $V_{obj}$  pour un objectif de soutien d'étiage, ou inférieur ou égal à  $V_{obj}$  pour un objectif de laminage des crues. C'est l'utilisation de  $V_{obj}$  qui suppose nécessairement un avenir connu pour cette gestion théorique ;
- la meilleure satisfaction possible par la suite de tout objectif concurrentiel caractérisé par un volume utilisable de nature inverse à celui de l'objectif aval courant (par

exemple, un objectif dont la satisfaction immédiate nécessite du vide plutôt que de l'eau dans les réservoirs, ou l'inverse)

La combinaison du premier but avec les deux derniers, qui nécessitent un volume d'eau présent égal à  $V_{obj}$ , produit dans chaque réservoir un volume d'eau présent égal à  $V_{op}$ , défini ci-dessous :

- pour un objectif de soutien d'étiage,  $V_{op}$  est le plus petit volume d'eau dans les réservoirs pouvant résulter d'une gestion opérationnelle satisfaisant l'objectif aval du mieux possible (exemple : figure 4.7.A (a), limnigrammes jaunes) ; on maintient le volume présent à sa plus basse valeur compatible avec la meilleure satisfaction ultérieure de l'objectif aval ( $V_{obj}$ ), sauf quand les prélèvements destinés au soutien immédiat entraînent un volume inférieur ( $V_{ges}$ ) :

$$V_{op} = \min(V_{ges} ; V_{obj}) \quad [121]$$

- pour un objectif de laminage de crue,  $V_{op}$  est le plus grand volume d'eau dans les réservoirs pouvant résulter d'une gestion opérationnelle satisfaisant l'objectif aval du mieux possible (exemple : figure 4.7.B (a), limnigrammes jaunes); on maintient le volume présent à sa plus haute valeur compatible avec la meilleure satisfaction ultérieure de l'objectif aval ( $V_{obj}$ ), sauf quand les emmagasineurs destinés au soutien immédiat entraînent un volume supérieur ( $V_{ges}$ ) :

$$V_{op} = \max(V_{ges} ; V_{obj}) \quad [122]$$

Compte tenu des écoulements naturels sur la période simulée, des contraintes physiques et consignes locales des réservoirs et du principe adopté pour la répartition des tâches entre réservoirs,  $V_{op}$  est le volume d'eau dans les réservoirs qui résulte d'une gestion opérationnelle visant en priorité à satisfaire du mieux possible l'objectif aval, tout en pénalisant le moins possible d'autres objectifs. Son calcul reposant sur celui de  $V_{obj}$ , qui ne peut être fait qu'a posteriori,  $V_{op}$  est un volume "opérationnel optimal" purement théorique.

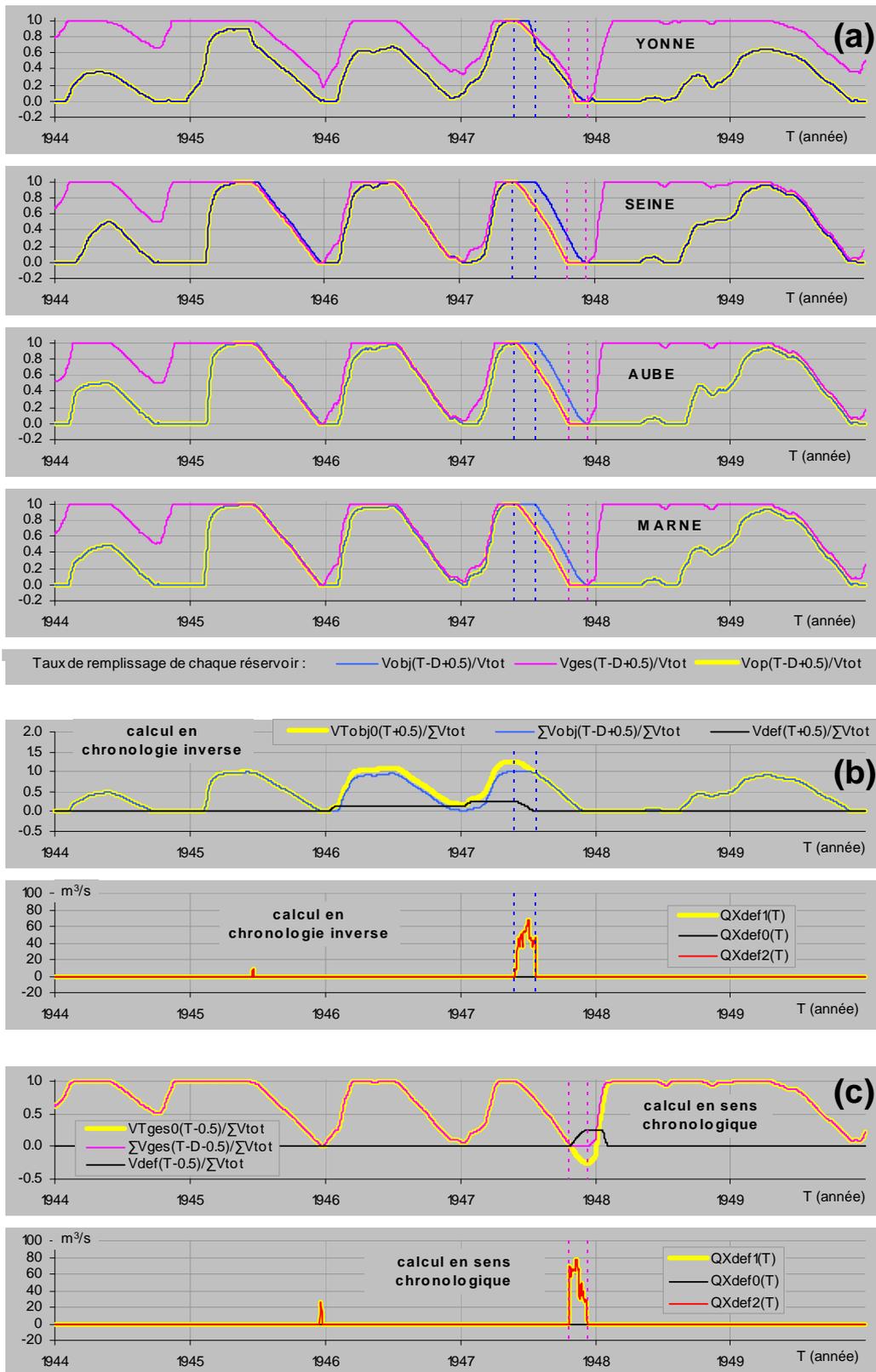


Figure 4.7.A : exemple de chroniques de résultats dans le cas d'un soutien d'étiage à 125 m<sup>3</sup>/s dans la Seine à Paris (période de calcul 1900-2009, mode de répartition 4 visant l'équilibre de  $T_{pot1}$ ), sur une période présentant des défaillances non nulles

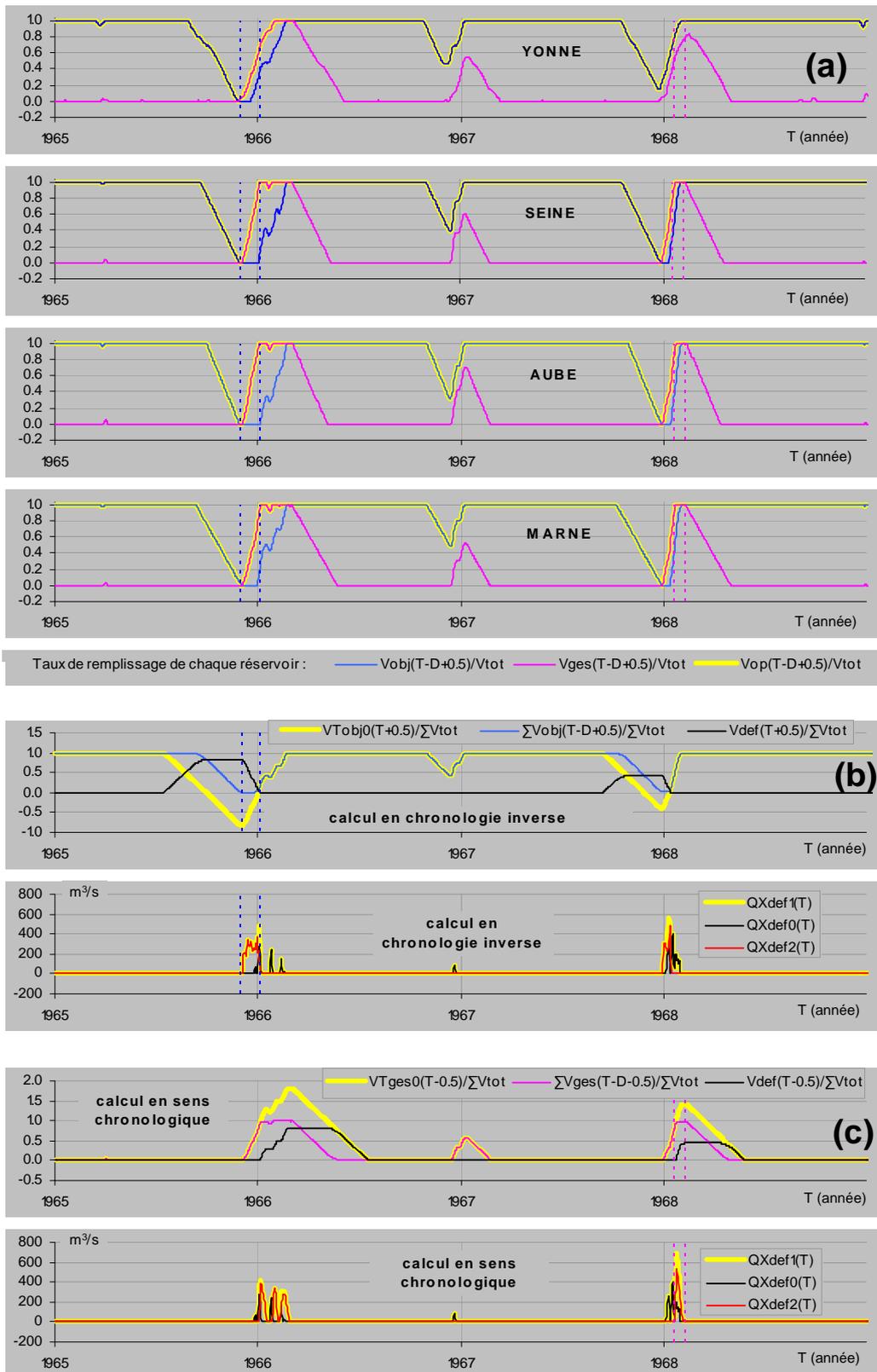


Figure 4.7.B : exemple de chroniques de résultats dans le cas d'un laminage de crue à 800 m<sup>3</sup>/s dans la Seine à Paris (période de calcul 1900-2009, mode de répartition 4 visant l'équilibre de Tpot1), sur une période présentant des défaillances non nulles

## 4.8 EVALUATION DU MANQUE DE CAPACITÉ GLOBALE DES RÉSERVOIRS ENTRAÎNANT DES DÉFAILLANCES DE SATISFACTION DE L'OBJECTIF AVAL EN PLUS DES DÉFAILLANCES INÉVITABLES ABSOLUES

Chaque défaillance  $QX_{def2}$ , qui s'ajoute aux défaillances inévitables  $QX_{def0}$  pour former les défaillances totales  $QX_{def1}$ , est due à un manque de capacité sur au moins un des réservoirs. Pour un objectif de soutien d'étiage, elle résulte de valeurs trop élevées de  $QST_{min2}$ , liées à l'impossibilité pour le volume  $V$  de prendre des valeurs inférieures à 0 en chronologie normale ou supérieures à  $V_{tot}$  en chronologie inverse. Pour un objectif de laminage de crue, elle résulte de valeurs trop faibles de  $QST_{max2}$ , liées à l'impossibilité pour le volume  $V$  de prendre des valeurs supérieures à  $V_{tot}$  en chronologie normale ou inférieures à 0 en chronologie inverse.

On envisage le cas purement théorique où dans chaque réservoir le volume  $V$  pourrait prendre, si nécessaire, des valeurs négatives ou supérieures à  $V_{tot}$  pour éviter toute défaillance  $QX_{def2}$  et ainsi limiter les défaillances à leurs seules valeurs inévitables  $QX_{def0}$ . La meilleure satisfaction possible de l'objectif aval avec ce dispositif virtuel est obtenue grâce à une évolution théorique du volume global d'eau présent qui, comparée avec celle qui est obtenue avec le dispositif réel (volumes  $V$  limités entre 0 et  $V_{tot}$ ), donne le manque global  $V_{def}$  d'eau ou de vide dans les réservoirs (correspondant à un manque de capacité de l'ensemble des réservoirs), responsable des défaillances  $QX_{def2}$ .

La valeur maximale de  $V_{def}$  indique finalement le manque de capacité globale des réservoirs pour éviter toute défaillance  $QX_{def2}$  sur la période analysée.

### 4.8.1 Simulation en chronologie inverse : calcul du manque global de volume d'eau ou de vide disponible, responsable de défaillances $QX_{def2}$ futures

Pour un temps  $T$  décroissant de  $T_{fin}$  à  $T_{init}$ , on simule en chronologie inverse l'évolution d'un volume d'eau virtuel  $V_{Tobj0}$  sur l'ensemble des réservoirs, initialisé au temps  $T_{fin}+dT/2$  à la valeur  $\sum V_{objj}(T_{fin}-D_j+dT/2)$  et vérifiant la relation suivante :

- pour un objectif de soutien d'étiage,  $V_{Tobj0}$  est supérieur à 0 et peut être supérieur à  $\sum V_{toti}$  :

$$V_{Tobj0}(T-dT/2) = \max\{\sum V_{objj}(T-dT/2); V_{Tobj0}(T+dT/2)-dT \times \sum \min[\max(QX_{sous}(T); \sum QST_{min1i}(T-D_i)); \sum QST_{max1i}(T-D_i)]\} \quad [123]$$

- pour un objectif de laminage de crue,  $V_{Tobj0}$  est inférieur à  $\sum V_{toti}$  et peut être négatif :

$$V_{Tobj0}(T-dT/2) = \min\{\sum V_{objj}(T-dT/2); V_{Tobj0}(T+dT/2)-dT \times \sum \min[\max(QX_{sous}(T); \sum QST_{min1i}(T-D_i)); \sum QST_{max1i}(T-D_i)]\} \quad [124]$$

L'absence de toute défaillance  $QX_{def2}$  au temps  $T$  et ultérieurement nécessite, par rapport à l'état global de remplissage des réservoirs en situation réelle, donné par  $\sum V_{objj}(T-D_j-dT/2)$ , un supplément  $V_{def}$  de volume d'eau ou de vide évalué ainsi :

- pour un objectif de soutien d'étiage,  $V_{def}$  correspond à un manque de volume d'eau présent en fin de pas de temps, causant une défaillance non nulle de débit  $QX_{def2}$  (exemple : figure 4.7.A (b)) :

$$V_{def}(T-dT/2) = VT_{obj0}(T-dT/2) - \sum V_{objj}(T-D_j-dT/2) \quad [125]$$

- pour un objectif de laminage de crue,  $V_{def}$  correspond à un manque de volume vide présent en fin de pas de temps, causant une défaillance non nulle de débit  $QX_{def2}$  (exemple : figure 4.7.B (b)) :

$$V_{def}(T-dT/2) = \sum V_{objj}(T-D_j-dT/2) - VT_{obj0}(T-dT/2) \quad [126]$$

#### **4.8.2 Simulation en chronologie normale : calcul du manque global de volume d'eau ou de vide disponible, responsable des défaillances $QX_{def2}$ passées**

Pour un temps  $T$  croissant de  $T_{init}$  à  $T_{fin}$ , on simule dans le sens chronologique l'évolution d'un volume d'eau virtuel  $VT_{ges0}$  sur l'ensemble des réservoirs, initialisé au temps  $T_{init}-dT/2$  à la valeur  $\sum V_{ges_i}(T_{init}-D_i-dT/2)$  et vérifiant la relation suivante :

- pour un objectif de soutien d'étiage :

$$VT_{ges0}(T+dT/2) = \min\{\sum V_{ges_i}(T+dT/2) ; VT_{ges0}(T-dT/2)+dT \times \sum \min\{\max(QX_{sous}(T) ; \sum QST_{min1_i}(T-D_i)) ; \sum QST_{max1_i}(T-D_i)\}\} \quad [127]$$

- pour un objectif de laminage de crue :

$$VT_{ges0}(T+dT/2) = \max\{\sum V_{ges_i}(T+dT/2) ; VT_{ges0}(T-dT/2)+dT \times \sum \min\{\max(QX_{sous}(T) ; \sum QST_{min1_i}(T-D_i)) ; \sum QST_{max1_i}(T-D_i)\}\} \quad [128]$$

L'absence de toute défaillance  $QX_{def2}$  au temps  $T$  et précédemment nécessite, par rapport à l'état global de remplissage des réservoirs en situation réelle, donné par  $\sum V_{ges_i}(T-D_i+dT/2)$ , un supplément  $V_{def}$  de volume d'eau ou de vide évalué ainsi :

- pour un objectif de soutien d'étiage,  $V_{def}$  correspond à un manque de volume vide présent en fin de pas de temps, causant une défaillance non nulle de débit  $QX_{def2}$  (exemple : figure 4.7.A (c)) :

$$V_{def}(T) = \sum V_{ges_i}(T-D_i+dT/2) - VT_{ges0}(T+dT/2) \quad [129]$$

- pour un objectif de laminage de crue,  $V_{def}$  correspond à un manque de volume d'eau présent en fin de pas de temps, causant une défaillance non nulle de débit  $QX_{def2}$  (exemple : figure 4.7.B (c)) :

$$V_{def}(T) = VT_{ges0}(T+dT/2) - \sum V_{ges_i}(T-D_i+dT/2) \quad [130]$$

### **4.9 INTÉRÊT DES RÉSULTATS OBTENUS POUR LA GESTION OPÉRATIONNELLE DES RÉSERVOIRS : CHRONIQUES ANNUELLES ISO-FRÉQUENCE**

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 réel d'avenir inconnu.

Les chroniques pluriannuelles de valeurs obtenues sont donc traduites en chroniques annuelles iso-fréquence pour les variables suivantes :

- $Vobj$ , produit par les calculs effectués en chronologie inverse ;
- $Vop$ , obtenu en combinant  $Vobj$  calculé en chronologie inverse et  $Vges$  calculé en chronologie normale ;
- $QXdef0$  produit en chronologie normale ;
- $QXdef1$  produit en chronologie normale ;
- $Vdef$  produit en chronologie inverse et en chronologie normale.

La traduction d'une chronique pluriannuelle en chroniques annuelles iso-fréquence 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 tous les jours d'une année non bissextile.

Les figures 4.9.A à 4.9.D, accompagnées d'exemples d'interprétation, montrent des chroniques annuelles iso-fréquence obtenues pour les variables listées ci-dessus, dans le cas d'objectifs de gestion (soutien d'étiage à 125 m<sup>3</sup>/s ou laminage de crue à 800 m<sup>3</sup>/s) définis pour la Seine à Paris et traités avec le mode 4 de répartition des tâches entre réservoirs, visant l'équilibre entre réservoirs de la durée  $Tpot1$  de reconstitution du volume utilisable.

Les chronogrammes annuels iso-fréquence les plus utiles pour l'aide à la gestion en temps réel concernent les variables suivantes :

- $QXdef1$  : ces chroniques indiquent pour chaque jour de l'année les risques de fréquence  $1-F$  de défaillances minimales, pour une gestion visant à satisfaire du mieux possible l'objectif aval (manque de débit pour un objectif de soutien d'étiage ou excès de débit pour un objectif de laminage de crue). Ces défaillances sont constituées d'une part inévitable (due aux contraintes physiques et consignes aux prises et restitutions, ainsi qu'au manque global de capacité des ouvrages) et d'une part qui peut varier selon le mode de gestion concertée adopté (répartition des tâches entre réservoirs).
- $Vobj$  : pour chaque réservoir et pour chaque jour de l'année, ces chroniques indiquent le taux de remplissage minimal requis à la fréquence  $1-F$  (pour un objectif de soutien d'étiage) ou maximal à ne pas dépasser à la fréquence  $F$  (pour un objectif de laminage de crue) pour pouvoir satisfaire du mieux possible l'objectif aval par la suite. Pour un objectif de soutien d'étiage (respectivement laminage de crue), elles indiquent encore le risque de fréquence  $1-F$ , (respectivement  $F$ ) provoqué par un taux de remplissage trop faible (respectivement trop fort), d'entraîner des défaillances supplémentaires par rapport aux défaillances totales minimales  $QXdef1$ .

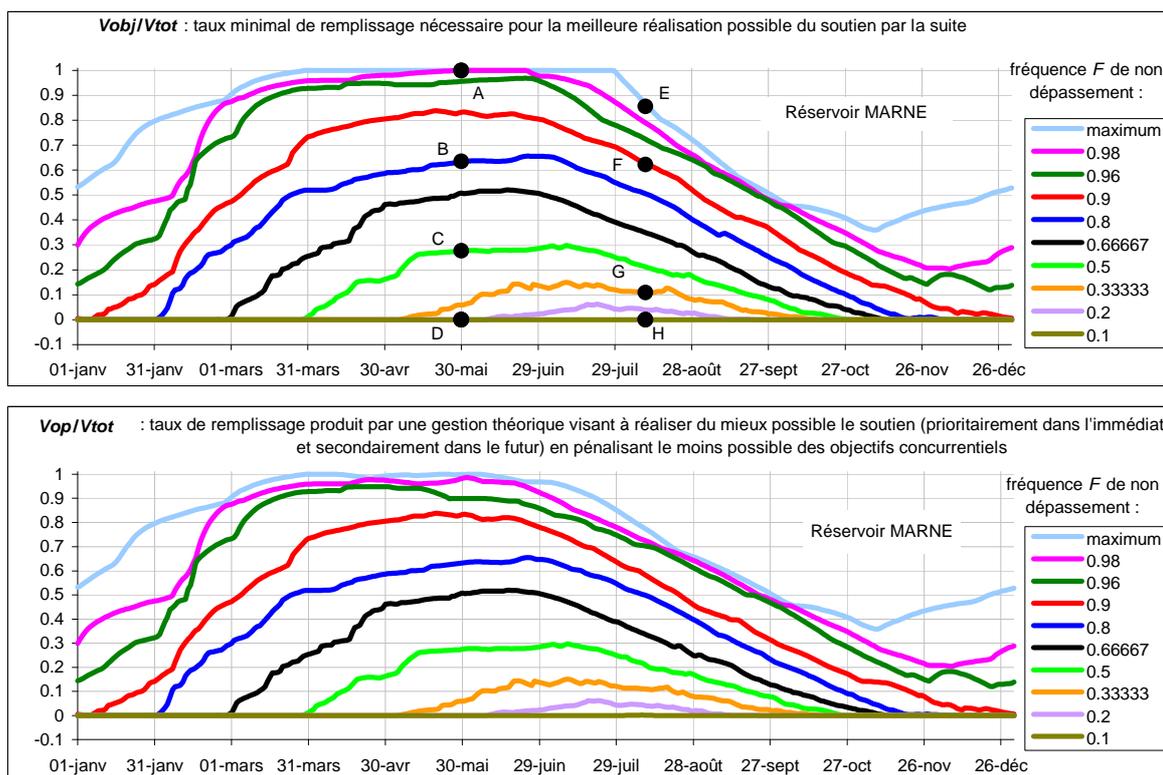


Figure 4.9.A : chronogrammes annuels iso-fréquence de  $V_{obj}/V_{tot}$  et  $V_{op}/V_{tot}$  dans le réservoir Marne, pour un soutien d'étiage à  $125 \text{ m}^3/\text{s}$  de la Seine à Paris (période 1900-2009, réservoirs version4, mode 4 de répartition entre réservoirs visant l'équilibre de  $T_{pot1}$ )

### Exemples d'interprétation

Les chronogrammes de  $V_{obj}/V_{tot}$ , taux minimal de remplissage nécessaire pour la meilleure satisfaction future possible de l'objectif de soutien, montrent que le réservoir doit reconstituer son stock en eau durant l'hiver et le printemps pour soutenir l'étiage en été et en automne. Chaque jour de l'année, un taux de remplissage égal à ce taux minimal entraîne –parce-que trop faible- un risque (de fréquence  $1-F$ ) d'échec ultérieur du soutien d'étiage, s'ajoutant aux éventuels échecs inévitables absolus. Dans le détail, on constate que :

- le 30 mai, ce taux minimal de remplissage nécessaire est : égal à 1 plus de 2 années sur 100 (point A) et moins de 4 années sur 100 ; supérieur ou égal à 0.63 pour 2 années sur 10 (point B) ; supérieur ou égal à 0.28 pour 1 année sur 2 (point C) ; nul plus de 2 années sur 10 (point D) et moins de 1 année sur 3 ;
- le 10 août, ce taux est : parfois (moins de 2 années sur 10) égal à 0.86, mais jamais supérieur à cette valeur (point E) ; supérieur ou égal à 0.62 pour 1 année sur 10 (point F) ; supérieur ou égal à 0.11 pour 2 années sur 3 (point G) ; nul plus de 1 année sur 10 et moins de 2 années sur 10 (point H).

La partie inférieure de la figure montre qu'une gestion théorique des réservoirs visant à satisfaire l'objectif de soutien nécessite parfois, pour la satisfaction immédiate de l'objectif, d'abaisser la réserve d'eau disponible de façon incompatible avec la meilleure satisfaction possible de l'objectif par la suite ( $V_{op}/V_{tot}$  inférieur à  $V_{obj}/V_{tot}$ ).

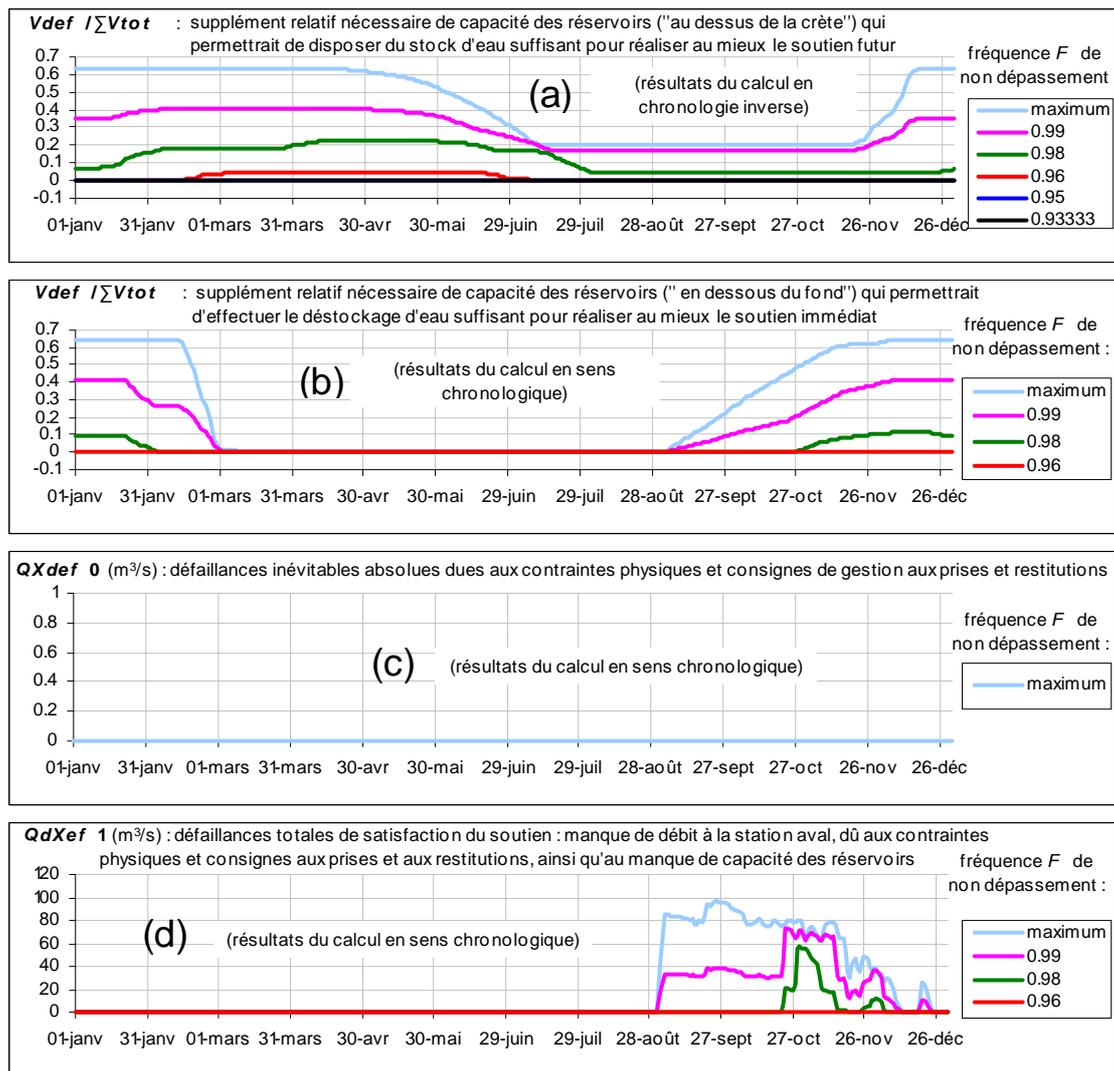


Figure 4.9.B : chronogrammes annuels iso-fréquence de  $V_{def}/\Sigma V_{tot}$ , de  $QX_{def0}$  et de  $QX_{def1}$ , pour un soutien d'étiage à  $125 \text{ m}^3/\text{s}$  de la Seine à Paris (période 1900-2009, réservoirs version4, mode 4 de répartition entre réservoirs visant l'équilibre de  $T_{pot1}$ )

### Exemples d'interprétation

La partie (a) de la figure montre que c'est globalement entre mi-avril et fin juillet ( $V_{def}/V_{tot}$  croissant en chronologie inverse) qu'il faudrait certaines années disposer de capacité supplémentaire dans les réservoirs, pour que ceux-ci puissent contenir tout le volume d'eau nécessaire à la meilleure réalisation possible du soutien d'étiage par la suite.

La partie (b) montre que c'est entre début septembre et mi décembre ( $V_{def}/V_{tot}$  croissant en sens chronologique) que l'on peut certaines années manquer d'eau à déstocker (du fait de réservoirs vides) pour assurer le mieux possible le soutien d'étiage dans l'immédiat.

La partie (c) montre qu'aucune contrainte physique ou consigne de gestion aux prises et restitutions n'empêche la réalisation du soutien d'étiage. Les défaillances de satisfaction du soutien, représentées sur la partie (d), sont donc toutes dues au manque de capacité des réservoirs et se produisent à la même période que celui-ci (b), de septembre à décembre.

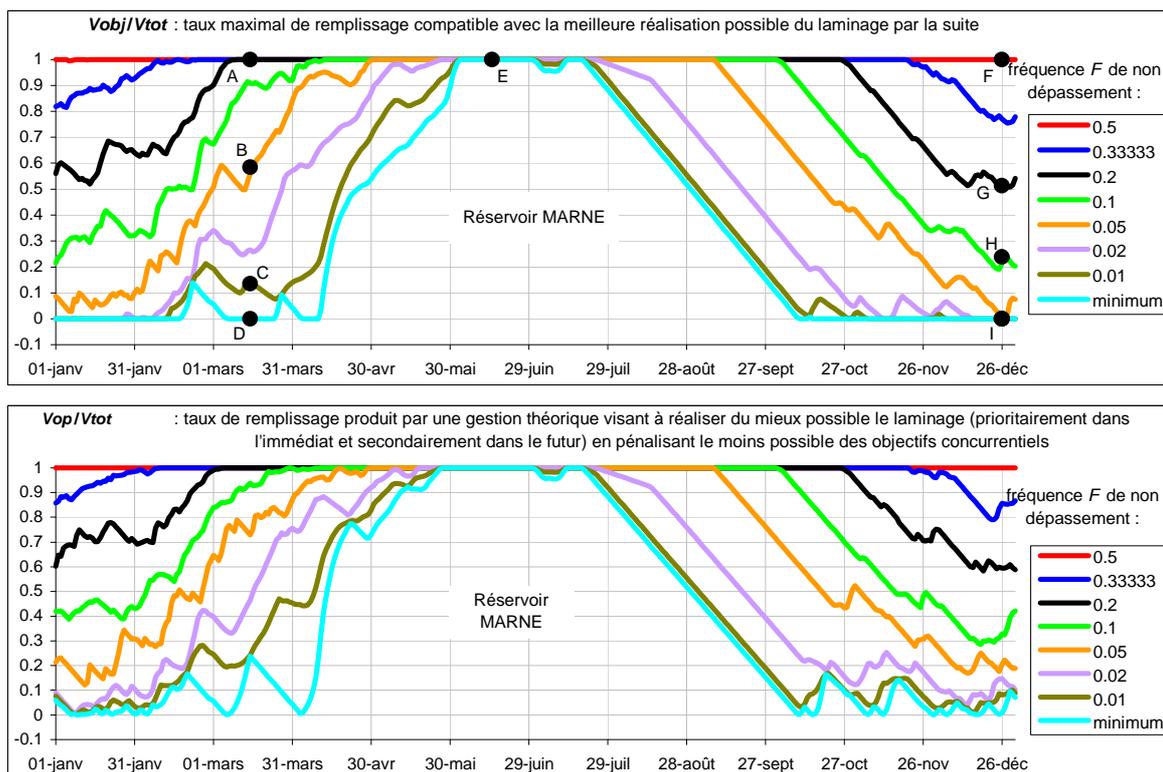


Figure 4.9.C : chronogrammes annuels iso-fréquence de  $V_{obj}/V_{tot}$  et  $V_{op}/V_{tot}$  dans le réservoir Marne, pour un laminage de crue à  $800 \text{ m}^3/\text{s}$  de la Seine à Paris (période 1900-2009, réservoirs version 4, mode 4 de répartition entre réservoirs visant l'équilibre de  $T_{pot1}$ )

### Exemples d'interprétation

Les chronogrammes de  $V_{obj}/V_{tot}$ , taux maximal de remplissage compatible avec la meilleure satisfaction possible de l'objectif de laminage par la suite, montrent que le réservoir doit reconstituer son volume vide disponible durant l'été et l'automne pour laminar la crue en hiver et au printemps. Chaque jour, un taux de remplissage égal à ce taux maximal entraîne –parce-que trop fort- un risque (de fréquence  $F$ ) d'échec ultérieur du laminage de crue, s'ajoutant aux éventuels échecs inévitables absolus. Dans le détail, on constate que :

- le 15 mars, ce taux maximal de remplissage compatible est : égal à 1 plus de 8 années sur 10 (point A) et moins de 9 années sur 10 ; inférieur ou égal à 0.58 pour 5 années sur 100 (point B) ; inférieur ou égal à 0.14 pour 1 année sur 100 (point C) ; parfois (moins de 1 année sur 100) nul (point D) ;
- le 15 juin ce taux est toujours égal à 1 (point E) ;
- le 26 décembre, ce taux est : égal à 1 plus de 1 année sur 2 (point F) et moins de 2 années sur 3 ; inférieur ou égal à 0.51 pour 2 années sur 10 (point G) ; inférieur ou égal à 0.24 pour 1 année sur 10 (point H) ; nul plus de 5 années sur 100 et moins de 1 année sur 10 (point I).

La partie inférieure de la figure montre qu'une gestion théorique des réservoirs visant à satisfaire l'objectif de laminage nécessite parfois, pour la satisfaction immédiate de l'objectif, de stocker dans le réservoir un volume d'eau incompatible avec la meilleure satisfaction possible de l'objectif par la suite ( $V_{op}/V_{tot}$  supérieur à  $V_{obj}/V_{tot}$ ).

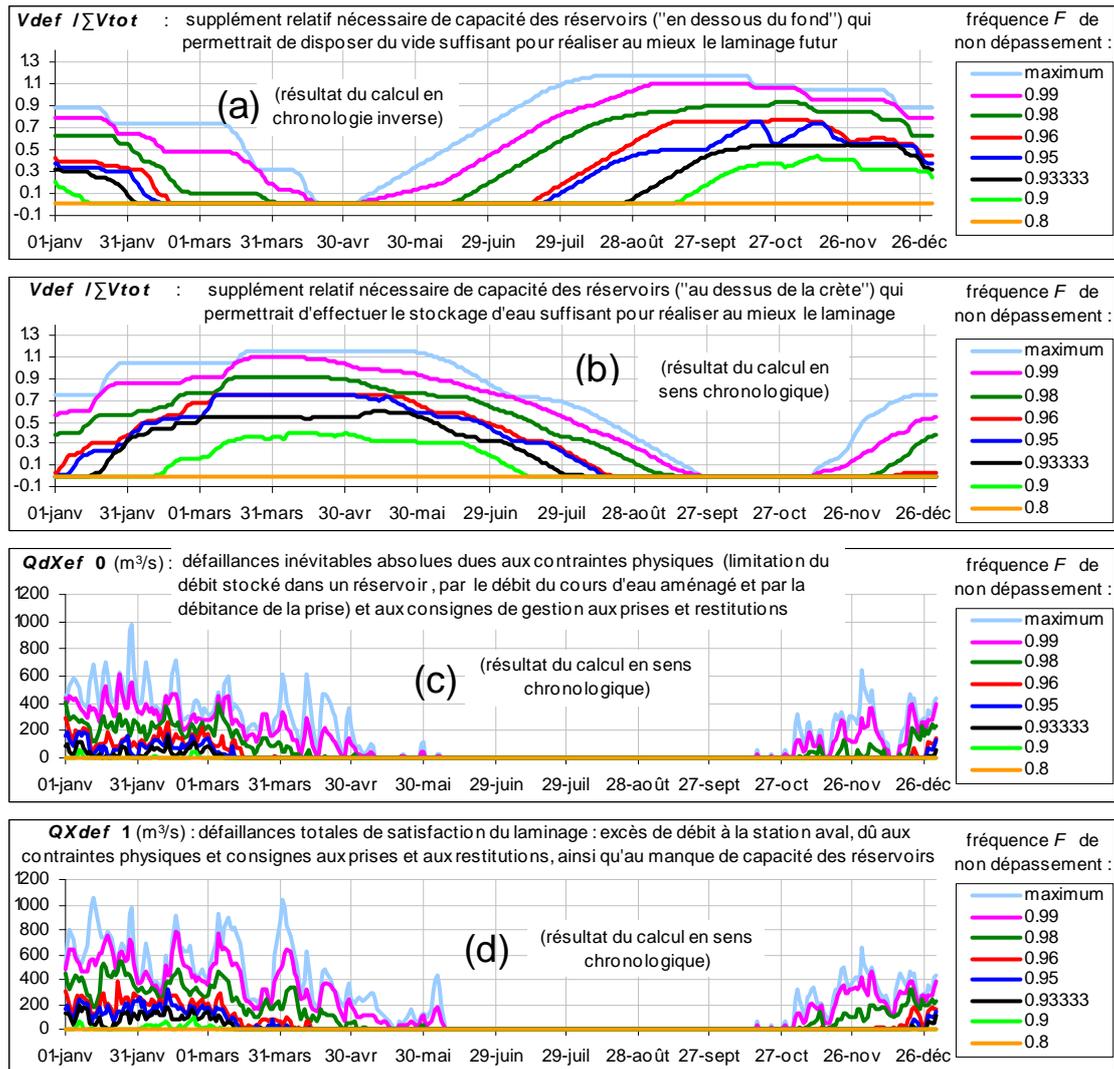


Figure 4.9.D : chronogrammes annuels iso-fréquence de  $V_{def}/\Sigma V_{tot}$ , de  $QX_{def0}$  et de  $QX_{def1}$ , pour un laminage de crue à  $800 \text{ m}^3/\text{s}$  de la Seine à Paris (période 1900-2009, réservoirs version 4, mode 4 de répartition entre réservoirs visant l'équilibre de  $T_{pot1}$ )

### Exemples d'interprétation

La partie (a) de la figure montre que c'est globalement entre mi-octobre et mi avril ( $V_{def}/V_{tot}$  croissant en chronologie inverse) qu'il faudrait certaines années disposer de capacité supplémentaire dans les réservoirs, pour que ceux-ci puissent contenir tout le volume de vide nécessaire à la meilleure réalisation possible du soutien d'étiage par la suite.

La partie (b) montre que c'est entre mi-novembre et mai ( $V_{def}/V_{tot}$  croissant en sens chronologique) que l'on peut certaines années manquer de vide (du fait de réservoirs pleins) pour réaliser au mieux le stockage d'eau nécessaire au laminage de crue immédiat.

La partie (c) montre qu'à tout moment entre novembre et juin, les débitances maximales des prises et le débit de cours d'eau non contrôlés peuvent empêcher (moins de 2 années sur 10) de réaliser le laminage souhaité. Les défaillances totales (d), qui intègrent en plus les défaillances dues au manque de capacité des réservoirs, se traduisent par un excès de débit à Paris pouvant parfois (moins de 1 année sur 100, le 13 janvier et le 1er avril) dépasser  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ .

## 5 IMPLÉMENTATION DE LA MÉTHODE : LOGICIEL VGEST

Le programme VGEST.EXE, développé en langage FreePascal, permet d'appliquer la méthode 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 et en parallèle (entre un et quatre), pour les cinq modes envisagés de répartition des tâches entre réservoirs. Ce programme, qui effectue des simulations au pas de temps journalier, exploite des paramètres et données qui doivent être préalablement stockés dans des fichiers de type texte, décrits ci-dessous.

### 5.1 FICHIERS DE PARAMÈTRES UTILISÉS EN ENTRÉE DU PROGRAMME

Les fichiers décrits ci-dessous sont indispensables (sauf les cinq derniers) pour le fonctionnement du programme et doivent être placés (directement ou dans certains sous répertoires) dans le répertoire "PARAMETR", lui-même situé directement dans le répertoire contenant le fichier VGEST.EXE. Leur contenu doit vérifier un format imposé et 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. Ce fichier, qui doit être placé dans le répertoire "PARAMETR\STATIONS", contient essentiellement la liste des réservoirs situés à l'amont, grâce auxquels on souhaite contrôler les écoulements à la station. Son format est le suivant :

- ligne 1 : en-tête libre ;
- ligne 2 [1 chaîne de 1 à 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 physiques et consignes de gestion aux prises et restitutions des réservoirs

Le répertoire "PARAMETR\BARRAGES" doit contenir entre 1 et 25 sous-répertoires correspondant à différents scénarios de contraintes et consignes de gestion locales des

réservoirs. Le nom de chacun de ces sous-répertoires doit être un entier compris entre 1 et l'effectif des scénarios. Pour qu'un scénario de contraintes et consignes puisse être exploité, le sous-répertoire associé doit contenir un fichier texte nommé "VERSION.TXT" dont la première ligne décrit ledit scénario, ainsi qu'un fichier texte particulier pour chaque réservoir mentionné par une des lignes 4 à 3+K dans le fichier associé à la station objectif.

Pour chaque réservoir, le nom de ce fichier texte associé 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, avec des débits exprimés en m<sup>3</sup>/s et des volumes en hm<sup>3</sup> :

- 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 [1 entier  $N$  compris entre 1 et 10, suivi de  $2N$  réels] : barème  $V \rightarrow QE_{min}$  (effectif, valeurs de  $V$  classées en ordre croissant, valeurs de  $QE_{min}$ ) ;
- ligne 4 [1 entier  $N$  compris entre 1 et 10, suivi de  $2N$  réels] : barème  $V \rightarrow QE_{max}$  (effectif, valeurs de  $V$  classées en ordre croissant, valeurs de  $QE_{max}$ ) ;
- ligne 5 [1 entier  $N$  compris entre 1 et 10, suivi de  $2N$  réels] : barème  $V \rightarrow QS_{min}$  (effectif, valeurs de  $V$  classées en ordre croissant, valeurs de  $QS_{min}$ ) ;
- ligne 6 [1 entier  $N$  compris entre 1 et 10, suivi de  $2N$  réels] : barème  $V \rightarrow QS_{max}$  (effectif, valeurs de  $V$  classées en ordre croissant, valeurs de  $QS_{max}$ ) ;
- ligne 7 [1 réel positif ou nul] : volume total  $V_{tot}$  du réservoir (compris entre le niveau max de la tranche morte et le niveau max de sécurité du réservoir) ;
- 4 groupes de lignes (concernant respectivement les débits de consigne  $QM_{res}$  (réservé dans le cours d'eau à l'aval de la prise),  $QV_{res}$  (réservé dans le cours d'eau à l'aval de la restitution),  $QM_{ref}$  (référence dans le cours d'eau à l'aval de la prise) et  $QV_{ref}$  (référence dans le cours d'eau 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  $Type < 0$ ). 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  $M( \leq N)$ ] : catégories de valeurs de  $Q$  détaillées dans les  $M$  lignes suivantes ;
  - 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  $QMnat > A1$  alors  $Q=B1$ , sinon, si  $QMnat > A2$  alors  $Q=B2$ , sinon..., si  $QMnat > Ax$  alors  $Q=Bx$ , sinon  $Q=QMnat$ .

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

Le répertoire "PARAMETR\RESEAUX" doit contenir entre 1 et 25 sous-répertoires correspondant à différents scénarios de réseaux de stations encadrant les réservoirs. Le nom de chacun de ces sous-répertoires doit être un entier compris entre 1 et leur effectif. Pour qu'un scénario de réseau de stations puisse être exploité, le sous-répertoire associé doit contenir un fichier texte nommé "VERSION.TXT" dont la première ligne décrit ledit scénario, ainsi qu'un fichier texte particulier pour chaque réservoir mentionné par une des lignes 4 à  $3+K$  dans le fichier associé à la station objectif.

Pour chaque réservoir, le nom du fichier associé 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, avec des temps exprimés en heure et des superficies exprimées toutes dans la même unité :

- 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  $D_v$  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  $D_m$  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  $D_{am}$  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  $D_{int}$  de propagation d'écoulement (heure) entre la station intermédiaire et la station aval du réseau local ;
- Ligne suivante [1 réel positif] : superficie  $S_{av}$  du bassin versant à la station aval du réseau local ;
- $N_a$  lignes suivantes [1 réel positif] : superficie  $S_v$  du bassin versant à chacun des  $N_a$  points de restitution ;
- $N_a$  lignes suivantes [1 réel positif] : superficie  $S_m$  du bassin versant à chacun des  $N_a$  points de prise ;
- $N_a$  lignes suivantes [1 réel positif] : superficie  $S_{am}$  du bassin versant à chacune des  $N_a$  stations amont du réseau local ;
- $N_i$  ligne suivante [1 réel positif] : superficie  $S_{int}$  du bassin versant à la station intermédiaire du réseau local.

#### **5.1.4 Fichier "RETOUR.TXT" décrivant le mode de calcul des fréquences observées et les valeurs de fréquence désirées pour l'analyse statistique des résultats**

Le fichier nommé "RETOUR.TXT", qui doit être placé dans le répertoire "PARAMETR" pour pouvoir être utilisé par le programme, est facultatif. Il permet d'imposer les valeurs de certains paramètres utilisés par le programme pour les calculs de statistiques. Ces valeurs (ou les valeurs par défaut de ces paramètres, le cas échéant) sont indiquées dans tous les fichiers produits par le programme, contenant des résultats statistiques.

##### **Mode de calcul des fréquences observées**

Pour un échantillon de  $N$  observations, classées par valeurs croissantes du rang 1 au rang  $N$ , la fréquence  $F$  de non dépassement de la valeur de rang  $n$  est calculée par la formule classique suivante, dans laquelle  $A$  et  $B$  sont des constantes :

$$F = (n-A)/(N+B)$$

La littérature propose plusieurs couples de valeurs pour les constantes  $A$  et  $B$  :

- $A=0$  ;  $B=0$  ;
- $A=0$  ;  $B=1$  ;
- $A=0.5$  ;  $B=0$  : formule de Hazen ;
- $A=0.375$  ;  $B=0.25$  : formule de Gauss ;
- $A=0.44$  ;  $B=0.12$  : formule de Gringorten ;
- $A=0.38$  ;  $B=0.31$  : formule de Chegodaxe.

Si le fichier "RETOUR.TXT" existe, les deux premières valeurs numériques qui peuvent y être lues (éventuellement sur une seule ligne) sont interprétées par le programme comme valeurs désirées pour les paramètres  $A$  (forcé entre 0 et 0.5) et  $B$  (forcé entre 0 et 1). Par

défaut (fichier inexistant, ou impossibilité d'y lire la valeur de  $A$  ou  $B$ ), c'est la formule de Hazen qui est utilisée dans le programme.

### **Temps de retour utilisés pour l'édition des résultats statistiques.**

Le fichier peut contenir 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.

Dans le fichier, les valeurs de  $TR$  doivent être situées obligatoirement après celles des paramètres  $A$  et  $B$ . Seules sont interprétées les 12 premières valeurs réelles supérieures ou égales à 2, lues sur le fichier à raison d'une valeur par ligne après la lecture des valeurs de  $A$  et  $B$ .

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. Chaque valeur de rang  $n$  est alors affectée d'une fréquence de non dépassement égale à  $(n-A)/(N+B)$ . Parmi les fréquences imposées par le fichier RETOUR.TXT ou par défaut, l'analyse statistique ne retient que celles qui sont comprises entre  $(1-A)/(N+B)$  et  $(N-A)/(N+B)$ , pour éviter les extrapolations de fonctions de répartition.

### **5.1.5 Fichier "REGLAGE.TXT" décrivant les différences entre valeurs fictives ( $VR_{tot}$ ) et réelles ( $V_{tot}$ ) de volume total exploitable pour chaque réservoir**

Le fichier nommé "REGLAGE.TXT", qui doit être placé dans le répertoire "PARAMETR", est facultatif. Pour des calculs utilisant le mode de répartition figé des tâches entre réservoirs (cf § 4.4.1.1), ce fichier permet de baser cette répartition (relation 43), non pas sur les valeurs réelles  $V_{tot}$  mais sur des valeurs fictives  $VR_{tot}$  de leurs volumes exploitables. Il contient les valeurs des écarts relatifs  $Ec$  souhaités entre  $VR_{tot}$  et  $V_{tot}$ , définis ainsi pour chaque réservoir :

$$Ec = VR_{tot}/V_{tot} - 1$$

Seules sont interprétées comme écarts  $Ec$  les  $K$  premières valeurs réelles lues dans le fichier, à raison d'une valeur par ligne.

Si le fichier n'existe pas ou s'il ne contient pas  $K$  valeurs interprétables pour  $Ec$ , alors  $VR_{tot}$  est considéré égal à  $V_{tot}$  pour chaque réservoir.

Dans le cas contraire, les valeurs de  $VR_{tot}$  sont calculées comme ci-dessous, en commençant par l'estimation d'un terme correctif  $Add$  destiné à garantir l'obtention d'une valeur positive ou nulle pour chaque réservoir de rang  $i$  :

$$Add = \max(0 ; -V_{tot_i} \times (1 + Ec_i)) \quad [131]$$

Remarque : le terme  $Add$  est nul si, comme il est préconisé plus bas, toutes les valeurs de  $Ec$  sont fixées supérieures à -1.

Une valeur intermédiaire  $VR_{tot_i}$  est ensuite estimée pour chaque réservoir de rang  $i$  :

$$VRtot_i' = Vtot_i \times (1 + Ec_i) + Add \quad [132]$$

Le volume exploitable fictif est alors donné par :

$$VRtot_i = VRtot_i' \times (\sum Vtot_i / \sum VRtot_i') \quad [133]$$

Avec une valeur de  $Ec$  imposée de façon arbitraire pour l'un des réservoir (par exemple,  $Ec = 0$  pour le réservoir de rang 1), ce mode d'évaluation permet de garantir que chaque jeu différent de  $K - 1$  valeurs de  $Ec$  supérieures ou égales à  $-1$  pour les autres réservoirs, donne un jeu différent de  $K$  valeurs de  $VRtot$ .

Enfin, si certaines valeurs de  $Ec$  sont inférieures ou égales à  $-1$ , la plus faible d'entre elles annule le volume fictif  $VRtot$  du réservoir correspondant.

Pour déterminer par itérations une répartition figée optimale des tâches entre réservoirs, minimisant un certain critère d'échec (voir § 6), on a donc tout intérêt à procéder de la façon suivante :

- initialiser le processus avec un jeu de valeurs nulles de  $Ec$ , qui revient à répartir la tâche entre les différents réservoirs en fonction des valeurs réelles de leurs volumes exploitables respectifs ;
- imposer une valeur pour l'écart  $Ec$  de l'un des réservoirs (par exemple : zéro). Le fait de laisser libre l'écart  $Ec$  pour tous les réservoirs peut en effet rendre plus difficile la recherche d'une solution optimale, du fait que des jeux différents mais proportionnels de valeurs de  $Ec$  donnent la même répartition des tâches entre réservoirs ;
- limiter l'exploration des écart  $EC$  libres à des valeurs supérieures à  $-1$ .

#### **5.1.6 Fichier "PUISS.TXT" conditionnant le type de moyenne calculée pour les défaillances de débit $QXdef0$ , $QXdef1$ et $QXdef2$**

Le fichier nommé "PUISS.TXT", qui doit être placé dans le répertoire "PARAMETR" pour pouvoir être utilisé par le programme, est facultatif. Il permet de modifier la valeur par défaut (égale à 2) du paramètre  $P$  utilisé pour calculer la moyenne suivante de chaque défaillance  $QXdef$  ( $QXdef0$ ,  $QXdef1$  et  $QXdef2$ ) :  $((\sum(QXdef^P))/N)^{1/P}$ . Cette moyenne, qui figure parmi les résultats de VGEST édités dans le fichier "BILAN" (cf § 5.5.1.2), correspond à la moyenne arithmétique pour  $P=1$  et à la moyenne quadratique pour  $P=2$ .

Si le programme peut lire une valeur dans le fichier "PUISS.TXT", il utilise celle-ci pour le paramètre  $P$  après lui avoir imposé de se situer entre 0.1 et 5. Dans le cas contraire, il utilise par défaut la valeur 2.

#### **5.1.7 Fichier "OUITRI.TXT" conditionnant l'édition de séries classées des défaillances obtenues**

Si, et seulement si, un fichier nommé "OUITRI.TXT" existe dans le répertoire "PARAM", le fichier "BILAN" donne parmi les résultats édités, pour chaque sens de calcul (chronologique et non chronologique), les défaillances  $QXdef1$  et  $QXdef2$  obtenues pour certaines fréquences de non dépassement, ainsi que les valeurs de ces défaillances classées par ordre décroissant (cf § 5.5.1.2).

Attention : cette édition des valeurs classées de défaillances peut nécessiter un temps de calcul assez long quand les défaillances présentent de très nombreuses valeurs non nulles.

### **5.1.8 Fichier "FREQNDEP" conditionnant les hydrogrammes iso-fréquences des cours d'eau utilisés pour le mode 5 de répartition des tâches entre réservoirs**

Le fichier "FREQNDEP", qui est facultatif, ne concerne que les calculs effectués avec le mode 5 de répartition des tâches entre réservoirs (§ 4.4.1.5), qui vise à satisfaire l'objectif aval tout en équilibrant les durées potentielles minimales  $T_{pot1}$  (de reconstitution de volume utilisable maximal) ou  $T_{pot2}$  (d'épuisement du volume utilisable). Ces durées  $T_{pot1}$  et  $T_{pot2}$  sont calculées en tenant compte du débit des cours d'eau au droit des prises, censé varier conformément à des hydrogrammes annuels iso-fréquence. La fréquence de non dépassement de ces hydrogrammes peut être choisie à l'aide du fichier facultatif "FREQNDEP".

Si le fichier "FREQNDEP" existe dans le répertoire "PARAMETR", et si le programme peut y lire une valeur numérique, celle-ci est utilisée (après correction si nécessaire, pour se situer entre 0.005 et 0.995) pour définir cette fréquence. Dans le cas contraire (fichier inexistant, ou ne contenant pas de valeur numérique), la fréquence est fixée par défaut à 0.5.

## **5.2 FICHER DE DONNÉES UTILISÉES EN ENTRÉE 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 (cf § 5.1.1 et 5.1.3).

La première ligne du fichier doit contenir les identifiants des stations nécessaires au calcul, placés dans un ordre arbitraire. Le programme n'interprète que les 255 premiers caractères de 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 et chaque lacune isolée est remplacée dans les calculs par une valeur reconstituée par interpolation linéaire à partir des deux débits qui l'encadrent.

### **Remarque concernant les données de débit naturel au droit des restitutions de réservoirs**

Parmi les résultats produits par le programme VGEST figurent les débits naturels  $QV_{nat}$  estimés dans les cours d'eau au droit des restitutions des réservoirs (cf § 5.5.2.1 et 5.5.2.3). En ajoutant ces chroniques de débit dans le fichier de données de débit, on a ensuite la possibilité d'utiliser le programme VGEST en considérant un objectif de gestion localisé à ce point de restitution. On peut vérifier- ce qui a été fait pour chacun des quatre réservoirs sur le bassin de la Seine- que ce calcul particulier mené pour un objectif de laminage de crue défini par un hydrogramme annuel  $QV_{obj}$  donne bien les mêmes résultats selon les deux cas de figure suivants :

- $QV_{ref} = QV_{obj}$  et  $QX_{obj} = \text{infini}$
- $QV_{ref} = \text{infini}$  et  $QX_{obj} = QV_{obj}$

Les stations fictives situées au droit des restitutions, pour lesquelles les débits naturels ont été ajoutés dans le fichier de données (version : "DATA\_RE1.TXT" pour le régime observé naturalisé), et pour lesquelles ont été créés les fichiers de paramètres de station objectif (cf § 5.1.1) ont été nommées R\_Yon, R\_Sei, R\_Aub et R\_Mar pour les réservoirs Yonne, Seine, Aube et Marne respectivement.

## **5.3 FICHIER D'OBJECTIF UTILISÉ EN ENTRÉE 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] exprimé en  $m^3/s$ . 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 EXÉCUTION DU PROGRAMME VGEST**

Dès son lancement, le programme commence par effectuer les opérations suivantes :

- suppression (s'il existe) d'un fichier nommé "FIN.TXT" situé dans le répertoire contenant VGEST.EXE ;
- effacement, dans le répertoire "RESULTAT", du contenu d'éventuels fichiers de résultats produits par un calcul précédent.

Après quoi, il sollicite l'utilisateur pour la saisie des 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 au § 5.1.1 ;
- scénario des contraintes et consignes locales des réservoirs (cf § 5.1.2) ;
- scénario des réseaux de stations encadrant les réservoirs (cf § 5.1.3) ;
- mode d'édition des résultats de volume (valeurs absolues ou valeurs relatives rapportées aux capacités des réservoirs) ;
- mode de répartition du débit stocké entre les réservoirs, avec options éventuelles ;
- 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 "PARAMETR" 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 indiquant la station où l'objectif de gestion est localisé (cf § 5.1.1) ;
- nom du sous-répertoire de "PARAM\BARRAGES" contenant les paramètres de contraintes et consignes locales à utiliser (cf § 5.1.2) ;
- nom du sous-répertoire de "PARAM\RESEAUX" contenant les paramètres de réseaux de stations à utiliser (cf § 5.1.3) ;
- nom du fichier de données des débits moyens journaliers naturels aux stations (cf § 5.2) ;
- nom du fichier de l'hydrogramme annuel de débit objectif à la station aval (cf § 5.3) ;

- 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 ;
- entier indiquant le mode d'édition des résultats de volume : 1 pour valeurs absolues en m<sup>3</sup> ; 2 pour valeurs relatives (volumes rapportés aux capacités des réservoirs) ;
- entier entre 1 et 5 indiquant le mode de répartition du débit stocké entre les réservoirs ;
- entier (utilisé seulement pour les modes 4 et 5 de répartition du débit stocké) indiquant le choix de la durée à équilibrer : 1 pour  $T_{pot1}$  ; autre valeur pour  $T_{pot2}$ .

Après le paramétrage des calculs, le programme effectue les simulations nécessaires pour déterminer les chroniques de volumes d'eau présents  $V_{obj}$  et  $V_{ges}$  conformément à la théorie présentée plus haut, respectivement en chronologie inverse et en sens chronologique. Ces calculs s'accompagnent d'une édition de résultats sur des fichiers de type texte, décrits plus bas.

Enfin, les dernières opérations effectuées par le logiciel consistent à créer puis fermer le fichier nommé "FIN.TXT", initialement supprimé au début de l'exécution. Ce fichier peut donc être utilisé pour contrôler automatiquement le déroulement du programme VGEST.

## 5.5 FICHIERS DE RÉSULTATS

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 et donnant certains résultats synthétiques

#### *5.5.1.1 Fichier "CondStat" décrivant les paramètres du calcul et donnant certaines statistiques de résultats*

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, ainsi que le mode de répartition adopté pour le stockage de débit entre les différents réservoirs. 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 des statistiques de résultats obtenus dans les deux sens de calcul (chronologie normale et inverse), concernant la position des variables suivantes par rapport aux différentes bornes imposées par les contraintes physiques et consignes de gestion :

- débit stocké global  $QX_{\text{sous}}$  sur l'ensemble des réservoirs, nécessaire pour l'obtention d'un débit égal à  $QX_{\text{obj}}$  à la station aval ;
- pour chaque réservoir : débits stocké net  $QST$ , entrant  $QE$ , et sortant  $QS$  dans le réservoir ; débit  $QV$  dans le cours d'eau à l'aval immédiat de la restitution.

#### ***5.5.1.2 Fichier "BILAN" décrivant la sollicitation des réservoirs et les défaillances de satisfaction de l'objectif aval***

Le fichier "BILAN" donne certains résultats décrivant la sollicitation des réservoirs et la satisfaction de l'objectif de gestion aval, qui permettent de comparer les performances de différents mode de répartition des tâches entre réservoirs. Ces résultats, qui peuvent être utilisées en particulier pour la recherche d'une répartition figée optimale (mode de répartition 1), concernent :

- valeur moyenne sur la période de calcul, du taux de remplissage de chaque réservoir :
  - $V_{obj}/V_{tot}$  calculé en chronologie inverse (valeur minimale à dépasser pour la meilleure satisfaction possible d'un objectif de soutien de débit par la suite, ou valeur maximale à ne pas dépasser pour un objectif de laminage de débit) ;
  - $V_{ges}/V_{tot}$  calculé en chronologie normale (valeur maximale pouvant être obtenue après la meilleure satisfaction possible d'un objectif de soutien de débit, ou valeur minimale pouvant être obtenue pour un objectif de laminage de débit) ;
- Pour chaque réservoir, valeur moyenne quadratique du taux de sollicitation obtenue en chronologie inverse et en chronologie normale, et moyenne de ces deux moyennes quadratiques. Le taux de sollicitation est défini ainsi :
  - calcul en chronologie inverse :  $V_{obj}/V_{tot}$  dans le cas d'un objectif de soutien d'étiage ;  $(V_{tot}-V_{obj})/V_{tot}$  dans le cas d'un objectif de laminage de débit ;
  - Calcul en chronologie normale :  $(V_{tot}-V_{ges})/V_{tot}$  pour un objectif de soutien de débit ;  $V_{ges}/V_{tot}$  pour un objectif de laminage de débit ;
- valeurs maximales sur la période de calcul, du manque relatif global  $V_{def}/\sum V_{tot_i}$  de capacité de l'ensemble des réservoirs, calculées en chronologie normale et en chronologie inverse ;
- résultats concernant les défaillances de satisfaction de l'objectif de gestion aval (manque de débit obtenu pour un objectif de soutien de débit, ou excès de débit obtenu pour un objectif de laminage de débit) :
  - effectif de différentes catégories de défaillances, distinguées selon leurs causes ;

- o valeurs moyennes quadratiques  $((\sum QXdef^P)/N)^{1/P}$  avec  $P=2$ ) des défaillances  $QXdef2$ ,  $QXdef1$  et  $QXdef0$  calculées en chronologie inverse et en chronologie normale, et moyenne des moyennes quadratiques ainsi obtenues dans les deux sens de calcul. ATTENTION : une valeur de  $P$  différente de 2 peut être utilisée si on le souhaite (les valeurs obtenues ne sont alors plus des moyennes quadratiques). Il suffit pour cela que le répertoire "PARAMETR" contienne un fichier texte nommé "PUISS.TXT", contenant la valeur désirée de  $P$  (cf § 5.1.6). Si nécessaire, le programme modifie la valeur de  $P$  lue dans ce fichier pour qu'elle se situe entre 0.1 et 5.
- o fonctions de répartition de  $QXdef1$  et  $QXdef2$  calculées en chronologie normale et chronologie inverse (moyenne, maximum, différents quantiles (fréquences 1/1000, 1/500, 1/200, 1/100, 1/50, 1/20, 1/10, 1/5 et 1/2) et minimum). ATTENTION : ces fonctions de répartition ne sont calculées par le programme VGEST et éditées dans le fichier "BILAN" que s'il existe un fichier nommé "OUITRI.TXT" dans le répertoire "PARAMETR" (§ 5.1.7.) ;
- o valeurs classées de  $QXdef1$  et  $QXdef2$  calculées en chronologie normale et chronologie inverse. ATTENTION : comme pour les caractéristiques listées ci-dessus, l'édition des valeurs classées de  $QXdef$  est conditionnée par l'existence du fichier "OUITRI" dans le répertoire "PARAMETR".

### ***5.5.1.3 Fichier "QMNquant"***

Le fichier "QMNquant" contient une série de 365 valeurs iso-fréquence classées par ordre chronologique du 1<sup>er</sup> janvier au 31 décembre, pour le débit  $QXsous$  à soustraire du régime naturel pour obtenir le débit  $QXobj$  à la station aval, ainsi que pour le débit naturel  $QMN$  du cours d'eau à l'amont immédiat de la prise de chaque réservoir. Chaque série est constituée de valeurs ayant sur la période analysée une même fréquence de non dépassement, égale à la fréquence lue dans le fichier "FREQNDEP" (§5.1.8).

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

### ***5.5.2.1 Fichier "Qobs-P-R.txt" : débits naturels simultanés à la station aval et aux points de prise et de restitution des réservoirs***

Le fichier nommé "Qobs-P-R.txt" donne les chroniques de valeurs moyennes journalières (affectées à 12H comme des valeurs instantanées) de débit  $QXnat$  pour la station située à l'aval du système et  $QMnat$  et  $QVnat$  pour chaque réservoir concerné. La période couverte correspond à celle du fichier de données utilisé et peut être plus grande que la période choisie pour les calculs. Chaque ligne du fichier correspond à une seule date, identique pour les différentes variables éditées.

### ***5.5.2.2 Fichier "QSynchro.txt" : débits naturels synchronisés à la station aval et aux points de prise et de restitution des réservoirs***

Le fichier nommé "QSynchro.txt", couvre quasiment la même période que le précédent, avec une date de début légèrement plus récente pour la station aval, justifiée par les temps de propagation de débit entre les réservoirs et cette station. Il donne les chroniques journalières de valeurs considérées comme instantanées pour les débits suivants : débit naturel  $QXnat$  et débit objectif  $QXobj$  à la station aval ; débit naturel  $QMnat$  au point de prise et  $QVnat$  au point de restitution de chaque réservoir.

Sur chaque ligne, les débits  $QMnat$  et  $QVnat$  de chaque réservoir correspondent à une date antérieure à celle des débits  $QXnat$  et  $QXobj$  à la station aval, décalée précisément du délai  $D$  de propagation des débits entre le réservoir et la station aval. Toutes les valeurs d'une même ligne peuvent donc être considérées comme synchronisées, du point de vue des relations de cause à effet entre les débits des cours d'eau au droit des réservoirs et celui du cours d'eau à la station aval.

### **5.5.2.3 Fichier "PaChrono.txt" : résultats détaillés du calcul en chronologie inverse**

Comme le précédent, ce fichier contient des chroniques de valeurs synchronisées entre les différents réservoirs et la station aval. Sur chaque ligne, qui concerne un pas de temps sur la période choisie pour les calculs, les variables suivantes sont éditées :

- pour la station aval, débit  $QXsous(T)$  à soustraire au débit naturel  $QXnat$  pour obtenir un débit  $QXobj$  ;
- pour chaque réservoir, des volumes (date  $T-D+0.5$ ) et des débits (date  $T-D$ ) :
  - volume d'eau présent  $Vobj$  ;
  - débitances min et max de prise et restitution ( $QEmin$ ,  $QEmax$ ,  $QSmin$ ,  $QSmax$ )
  - débits naturels  $QMnat$  et  $QVnat$  ;
  - limites de débit dans le cours d'eau, fixées par les consignes locales :  $QMref$ ,  $QMres$ ,  $QVref$ ,  $QVres$  ;
  - bornes  $QEinf$  et  $QEsup$  du débit pris, imposées par les contraintes physiques et consignes à la prise ;
  - limites minimales et maximales du débit stocké net, imposées par les contraintes physiques et consignes locales :  $QSTmin1$ ,  $QSTmax1$ ,  $QSTmin2$ ,  $QSTmax2$ ,  $QSTmin3$ ,  $QSTmax3$  ;
  - débit stocké  $QST$  dans le réservoir, débit produit  $QV$ , pris  $QE$  et restitué  $QS$  dans le cours d'eau ;
  - codes indiquant la position de  $QST$ ,  $QE$ ,  $QS$  et  $QV$  par rapport aux diverses bornes qui leurs sont imposées par les contraintes physiques et consignes locales
- pour l'ensemble des réservoirs :
  - volume d'eau  $VTobj(T+0.5)$  ( $= \sum Vobj_i(T-D_i+0.5)$ ) présent dans l'ensemble des réservoirs, égal à la somme des volumes  $Vobj$  synchronisés
  - volume d'eau  $VTobj0$  présent dans l'ensemble des réservoirs, calculé selon le même principe que  $VTobj$  mais en supposant que les réservoirs ne présenteraient pas de limites de capacité pouvant causer des défaillances de satisfaction de l'objectif aval. Contrairement à  $VTobj$ ,  $VTobj0$  peut être supérieur à  $\sum Vtot_i$  pour un objectif aval de soutien de débit, ou négatif pour un objectif de laminage de débit ;

- manque  $V_{def}(T+0.5) = \text{abs}(V_{Tobj0}(T+0.5) - V_{Tobj}(T+0.5))$  de capacité globale des réservoirs
- défaillances de débit  $QX_{def0}$ ,  $QX_{def1}$  et  $QX_{def2}$  (date  $T$  à la station aval)
- code décrivant la position du débit stocké global visé  $QX_{sous}$  (date  $T$  à la station aval) par rapport aux différentes bornes imposées aux dates  $T-D_i$  par les contraintes physiques et consignes locales

Par ailleurs, le fichier contient les chroniques de certaines variables qui diffèrent selon le mode adopté de répartition des tâches entre les réservoirs :

- variables concernant chaque réservoir :
  - mode 1 : part  $Part(T-D)$  du débit stocké global assignée au réservoir ;
  - mode 2 : durée potentielle minimale  $T_{pot}(T-D)$  de reconstitution du volume utilisable maximal à partir de l'instant  $T-D+0.5$  ; part  $Part(T-D)$  du débit stocké global assignée au réservoir ;
  - mode 3 : objectif commun  $V_{Robj}(T-D)$  de taux de remplissage ; objectif théorique  $QST_{pot}(T-D)$  de débit stocké ;
  - Modes 4 et 5 : durée potentielle minimale  $T_{pot1}(T-D)$  de reconstitution du volume utilisable maximal, ou  $T_{pot2}(T-D)$  d'épuisement du volume utilisable, à partir de l'instant  $T-D-0.5$ ; objectif théorique  $QST_{pot}(T-D)$  de débit stocké entre les instants  $T-D+0.5$  et  $T-D-0.5$ ;
- variables concernant l'ensemble des réservoirs :
  - modes 1 et 2 : débit  $QST0a(T)$  réparti entre les réservoirs au meilleur prorata possible de leurs parts assignées  $Part$  ;
  - modes 3, 4 et 5 : débit  $QST0b(T)$  ajouté au débit stocké théorique  $QST_{pot}(T-D)$  de chaque réservoir, pour l'obtention d'un débit égal à  $QX_{obj}(T)$  à la station aval

#### ***5.5.2.4 Fichier "Chrono.txt " : résultats détaillés du calcul en sens chronologique***

Ce fichier est l'équivalent du précédent, pour les calculs effectués cette fois dans le sens chronologique. Sur chaque ligne, qui concerne un pas de temps du calcul, les variables suivantes sont éditées :

- pour la station aval, débit  $QX_{sous}(T)$  à soustraire au débit naturel  $QX_{nat}$  pour obtenir un débit  $QX_{obj}$  ;
- pour chaque réservoir, des volumes (date  $T-D-0.5$ ) et des débits (date  $T-D$ ) :
  - volume d'eau présent  $V_{ges}$  ;
  - débitances min et max de prise et restitution ( $Q_{Emin}$ ,  $Q_{Emax}$ ,  $Q_{Smin}$ ,  $Q_{Smax}$ )
  - débits naturels  $Q_{Mnat}$  et  $Q_{Vnat}$  ;

- limites de débit dans le cours d'eau, fixées par les consignes locales :  $QMref$ ,  $QMres$ ,  $QVref$ ,  $QVres$  ;
  - bornes  $QEinf$  et  $QEsup$  du débit pris, imposées par les contraintes physiques et consignes à la prise ;
  - limites minimales et maximales du débit stocké net, imposées par les contraintes physiques et consignes locales :  $QSTmin1$ ,  $QSTmax1$ ,  $QSTmin2$ ,  $QSTmax2$ ,  $QSTmin3$ ,  $QSTmax3$  ;
  - débit stocké  $QST$  dans le réservoir, débit produit  $QV$ , pris  $QE$  et restitué  $QS$  dans le cours d'eau ;
  - codes indiquant la position de  $QST$ ,  $QE$ ,  $QS$  et  $QV$  par rapport aux diverses bornes qui leurs sont imposées par les contraintes physiques et consignes locales
- pour l'ensemble des réservoirs :
    - volume d'eau  $VTges(T-0.5)$  ( $= \sum Vges_i(T-D_i-0.5)$ ) présent dans l'ensemble des réservoirs, égal à la somme des volumes  $Vges$  synchronisés
    - volume d'eau  $VTges0$  présent dans l'ensemble des réservoirs, calculé selon le même principe que  $VTges$  mais en supposant que les réservoirs ne présenteraient pas de limites de capacité pouvant causer des défaillances de satisfaction de l'objectif aval. Contrairement à  $VTges$ ,  $VTges0$  peut être négatif pour un objectif aval de soutien de débit, ou supérieur à  $\sum Vtot_i$  pour un objectif de laminage de débit ;
    - manque  $Vdef(T-0.5) = abs(VTges0(T-0.5)-VTges(T-0.5))$  de capacité globale des réservoirs
    - défaillances de débit  $QXdef0$ ,  $QXdef1$  et  $QXdef2$  (date  $T$  à la station aval)
    - code décrivant la position du débit stocké global visé  $QXsous$  (date  $T$  à la station aval) par rapport aux différentes bornes imposées aux dates  $T-D_i$  par les contraintes physiques et consignes locales

Par ailleurs, le fichier contient les chroniques de certaines variables qui diffèrent selon le mode adopté de répartition des tâches entre les réservoirs :

- variables concernant chaque réservoir :
  - mode 1 : part  $Part(T-D)$  du débit stocké global assignée au réservoir ;
  - mode 2 : durée potentielle minimale  $Tpot(T-D)$  de reconstitution du volume utilisable maximal à partir de l'instant  $T-D-0.5$  ; part  $Part(T-D)$  du débit stocké global assignée au réservoir ;
  - mode 3 : objectif commun  $VRobj(T-D)$  de taux de remplissage ; objectif théorique  $QSTpot(T-D)$  de débit stocké ;
  - Modes 4 et 5 : durée potentielle minimale  $Tpot1(T-D)$  de reconstitution du volume utilisable maximal, ou  $Tpot2(T-D)$  d'épuisement du volume utilisable, à

partir de l'instant  $T-D+0.5$  ; objectif théorique  $QSTpot(T-D)$  de débit stocké entre les instants  $T-D-0.5$  et  $T-D+0.5$ ;

- variables concernant l'ensemble des réservoirs :
  - modes 1 et 2 : débit  $QST0a(T)$  réparti entre les réservoirs au meilleur prorata possible de leurs parts assignées  $Part$  ;
  - modes 3, 4 et 5 : débit  $QST0b(T)$  ajouté au débit stocké théorique  $QSTpot(T-D)$  de chaque réservoir, pour l'obtention d'un débit égal à  $QXobj(T)$  à la station aval

#### ***5.5.2.5 Fichiers "EchecQ-A.txt" et "EchecQ-B.txt" des défaillances de satisfaction de l'objectif aval***

Les fichiers "EchecQ-A.txt" et "EchecQ-B.txt" contiennent les chroniques de défaillances de débit  $QXdef0$ ,  $QXdef2$  et  $QXdef1$ , produites respectivement par les simulations effectuées en chronologie inverse et en sens chronologique sur la période choisie pour les calculs.

#### ***5.5.2.6 Fichier "Volumes.txt" des volumes d'eau dans les réservoirs.***

Le fichier nommé "Volumes.txt" couvre la période choisie pour le calcul. Il donne pour chaque réservoir les séries de valeurs simultanées des volumes  $Vobj$ ,  $Vges$  et  $Vop$ .

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

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

- "VOBJi.dat" : ce fichier, produit pour chaque réservoir de rang  $i$ , concerne la limite  $Vobj$  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  $Vobj$  qui peuvent être utilisées comme aide à la gestion en temps réel en avenir inconnu ;
- "VOPIi.dat" : ce fichier est également produit pour chaque réservoir de rang  $i$ . Il concerne la limite  $Vop$  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 ;
- "QXdef0B.dat" : ce fichier, produit par la simulation effectuée en sens chronologique, concerne les défaillances inévitables absolues  $QXdef0$  du débit obtenu à la station aval par rapport à l'objectif commun de gestion. Ces défaillances sont dues aux contraintes et consignes aux prises et restitutions des réservoirs, indépendamment de leurs capacités ;
- "QXdef1B.dat" : ce fichier, produit par la simulation effectuée en sens chronologique, concerne les défaillances globales  $QXdef1$  du débit obtenu à la station aval, par rapport à l'objectif commun de gestion. Ces défaillances sont dues aux contraintes et consignes aux prises et restitutions des réservoirs, ainsi qu'à leur manque de capacité ;
- "VDefA.dat" : ce fichier, produit par la simulation effectuée en sens chronologique inverse, concerne le manque global  $Vdef$  de capacité des réservoirs ;

- "VDefB.dat" : ce fichier, produit par la simulation effectuée en sens chronologique, concerne le manque global  $V_{def}$  de capacité des réservoirs.

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

- par ordre chronologique (une colonne par année, 365 lignes correspondant chacune à un quantième de l'année non bissextile) ;
- 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.

## **5.6 PERSPECTIVES DE DÉVELOPPEMENTS COMPLÉMENTAIRES**

Telle qu'elle est présentée plus haut (§**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) et implémentée dans le logiciel VGEST, la méthode proposée ne permet pour le moment qu'une prise en compte assez simpliste des consignes de gestion locales. Celles-ci sont en effet limitées aux seuls débits réservés et de référence dans le cours d'eau à l'aval des prises et restitutions ( $QM_{res}$ ,  $QM_{ref}$ ,  $QV_{res}$  et  $QV_{ref}$ ), représentés chacun par un hydrogramme limite annuel reproduit d'année en année, avec possibilité de prise en compte d'une limite imposée sur le gradient de variation du débit dans le cours d'eau.

La méthode actuelle permet d'envisager certaines améliorations (incompatibles avec la méthode initialement développée pour le programme Climaware), qui pourraient être implémentées dans VGEST à partir des théories ébauchées ci-dessous.

### **5.6.1 Prise en compte de consignes locales de gestion visant à respecter un volume d'eau présent minimal ou maximal**

De telles consignes peuvent être destinées par exemple à permettre certains usages récréatifs du plan d'eau, comme la navigation pendant la belle saison. Elles peuvent être définies par des chronogrammes annuels de volume minimal  $V_{min}$  et maximal  $V_{max}$  à respecter, reproduits d'année en année.

La prise en compte de ces consignes nécessite le calcul de limites minimale  $QST_{min4}$  et maximale  $QST_{max4}$  pour le débit stocké  $QST$ , comme indiqué ci-dessous :

- pour des calculs en chronologie normale, entre les temps  $T-dT/2$  et  $T+dT/2$  :

$$QST_{min4}(T) = (V_{min}(T+dT/2) - V(T-dT/2))/dT \quad [134]$$

$$QST_{max4}(T) = (V_{max}(T+dT/2) - V(T-dT/2))/dT \quad [135]$$

- pour des calculs en chronologie inverse, entre les temps  $T+dT/2$  et  $T-dT/2$  :

$$QST_{min4}(T) = (V(T+dT/2) - V_{max}(T-dT/2))/dT \quad [136]$$

$$QST_{max4}(T) = (V(T+dT/2) - V_{min}(T-dT/2))/dT \quad [137]$$

Si l'on fait l'hypothèse que les consignes de débit réservé et de référence à la prise et à la restitution sont prioritaires par rapport aux consignes concernant le volume d'eau présent, elles-mêmes prioritaire par rapport à l'objectif aval commun aux différents réservoirs, alors la méthode peut être adaptée très facilement, par simple remplacement des limites  $QST_{min1}$  et  $QST_{max1}$  dans toutes les relations où celles-ci interviennent (33, 34, 109, 111, 123, 124, 127 et 128), par les limites  $QST_{min1}'$  et  $QST_{max1}'$  évaluées ainsi :

$$QST_{min1}' = \max(QST_{min1}, \min(QST_{max1}, QST_{min4})) \quad [138]$$

$$QST_{max1}' = \min(QST_{max1}, \max(QST_{min1}, QST_{max4})) \quad [139]$$

### **5.6.2 Prise en compte de consignes locales visant une production hydroélectrique**

Une telle consigne peut être définie par un chronogramme annuel de puissance minimale  $P_{obj}$  à produire au barrage, reproduit d'année en année. Sa prise en compte se traduit par le respect de deux inégalités, dont la première signifie que le débit restitué  $QS$  doit être supérieur au débit turbiné minimal  $Qt_{min}$  nécessaire pour la production de  $P_{obj}$  pendant le pas de temps courant. La seconde, qui signifie que le débit stocké pendant le pas de temps courant doit permettre l'obtention d'un volume  $V$  suffisant en fin de pas de temps pour permettre la production de  $P_{obj}$  pendant le pas de temps suivant, impose une limite minimale  $QST_{min5}$  ou maximale  $QST_{max5}$  au débit stocké  $QST$ , selon le sens du calcul. Ces inégalités s'expriment ainsi :

- pour des calculs en chronologie normale, entre les temps  $T-dT/2$  et  $T+dT/2$  :

$$QS(T) \geq Qt_{min}(T) \quad [140]$$

$$QST(T) \geq (P_{max}^{-1}(P_{obj}(T+dT)) - V(T-dT/2)) / dT = QST_{min5}(T) \quad [141]$$

Le débit  $Qt_{min}$  doit être déterminé par encadrements successifs pour vérifier :

$$Qt_{min}(T) = \min\{P_{obj}(T), P_{max}(V(T-dT/2)) / (\rho \times g \times Re[Qt_{min}(T), f_1(V(T-dT/2)) - f_2(Qt_{min}(T))] \times [f_1(V(T-dT/2)) - f_2(Qt_{min}(T))])\} \quad [142]$$

- pour des calculs en chronologie inverse, entre les temps  $T+dT/2$  et  $T-dT/2$  :

$$QS(T) \geq Qt_{min}(T) \quad [143]$$

$$QST(T) \leq (V(T+dT/2) - P_{max}^{-1}(P_{obj}(T-dT))) / dT = QST_{max5}(T) \quad [144]$$

Le débit  $Qt_{min}$  doit être déterminé par encadrements successifs pour vérifier :

$$Qt_{min}(T) = \min\{P_{obj}(T), P_{max}(V(T+dT/2)) / (\rho \times g \times Re[Qt_{min}(T), f_1(V(T+dT/2)) - f_2(Qt_{min}(T))] \times [f_1(V(T+dT/2)) - f_2(Qt_{min}(T))])\} \quad [145]$$

Dans ces relations :  $P_{max}(V)$  représente la puissance maximale productible, fonction du volume d'eau  $V$  présent au temps  $T$ , définie par les caractéristiques de l'usine hydroélectrique ;  $P_{max}^{-1}$  est la fonction inverse de  $P_{max}$  ;  $\rho$  est la masse volumique de l'eau ;  $g$  est l'accélération de la pesanteur ;  $Re$  est le rendement de l'usine compris entre 0 et 1, fonction du débit turbiné et de la chute nette ;  $f_1$  est le niveau du plan d'eau dans le réservoir, croissant en fonction du volume  $V$  ;  $f_2$  est le niveau de plan d'eau à la restitution, croissant en fonction du débit restitué.

Si l'on fait l'hypothèse que les consignes de débit réservé et de référence à la prise et à la restitution sont prioritaires par rapport à la consigne de production d'énergie, elle-même prioritaire par rapport à l'objectif aval commun aux différents réservoirs, alors la méthode

peut être adaptée très facilement, par simple remplacement des limites  $QST_{min1}$  et  $QST_{max1}$  dans toutes les relations où celles-ci interviennent (33, 34, 109, 111, 123, 124, 127 et 128), par les limites  $QST_{min1}''$  et  $QST_{max1}''$  évaluées ainsi :

- pour des calculs en chronologie normale, les relations 12, 22, 140 et 141 imposent l'encadrement suivant de  $QST$ , dont on déduit les valeurs de  $QST_{min1}''$  et  $QST_{max1}''$  :

$$QST_{min5} \leq QST \leq Q_{Esup} - Q_{tmin} \quad [146]$$

$$QST_{min1}'' = \max(QST_{min1}, \min(QST_{max1}, QST_{min5})) \quad [147]$$

$$QST_{max1}'' = \min(QST_{max1}, \max(QST_{min1}, Q_{Esup} - Q_{tmin})) \quad [148]$$

- pour des calculs en chronologie inverse, les relations 12, 22, 143 et 144 imposent l'inégalité suivante à  $QST$ , dont on déduit la valeur de  $QST_{max1}''$  ( $QST_{min1}''$  restant égal à  $QST_{min1}$ , inchangé) :

$$QST < \min(QST_{max5}, Q_{Esup} - Q_{tmin}) \quad [149]$$

$$QST_{max1}'' = \min(QST_{max1}, \max(QST_{min1}, \min(QST_{max5}, Q_{Esup} - Q_{tmin}))) \quad [150]$$

## 6 APPLICATION DE LA MÉTHODE AVEC OPTIMISATION D'UNE RÉPARTITION FIGÉE DES TÂCHES (MODE 1) ENTRE RÉSERVOIRS : PROGRAMME SURVGEST

Avec le mode 1 de répartition des tâches entre réservoirs (voir § 4.4.1.1), le programme VGEST assigne à chaque réservoir, à chaque pas de temps, une part figée de l'objectif de débit stocké  $QX_{sous}$ . La clé de répartition figée utilisée peut correspondre, au choix, à des parts proportionnelles aux capacités des différents réservoirs, ou à d'autres valeurs qu'il est alors possible d'optimiser en fonction de certains critères, à l'aide du programme SURVGEST.BAT.

### 6.1 CRITÈRES D'ÉVALUATION DES RÉSULTATS DE VGEST UTILISÉS PAR LA PROCÉDURE D'OPTIMISATION

Les résultats produits par VGEST avec une clé de répartition donnée du stockage entre réservoirs sont évalués par la procédure d'optimisation de SURVGEST à partir des deux critères suivants tirés du fichier "BILAN" (voir § 5.5.1.2) :

- *CRIT1* est la moyenne quadratique des défaillances supplémentaires  $QX_{def2}$ , qui s'ajoutent aux défaillances inévitables absolues  $QX_{def1}$ , du fait des volumes d'eau présents dans les réservoirs et de leurs capacités. Ce critère caractérise directement des échecs obtenus vis-à-vis de l'objectif de gestion envisagé et on a intérêt à le minimiser. A la place de la moyenne quadratique, on peut utiliser si on le souhaite pour *CRIT1* la moyenne arithmétique ou un autre type de moyenne de  $QX_{def2}$  (cf § 5.1.6).
- *CRIT2* est la valeur maximale sur les réservoirs, du taux moyen quadratique de sollicitation. On a également intérêt à minimiser ce critère, car la sollicitation excessive d'un réservoir peut pénaliser d'éventuels objectifs concurrentiels.

Si une valeur entière de 1, 2 ou 3 (valeur par défaut) peut être lue dans le fichier "PAROPT.TXT" pour le paramètre *Que/Chron* (voir § 6.3.1), ce sont respectivement les résultats obtenus en chronologie inverse, en sens chronologique ou par moyenne des deux qui, lus dans le fichier "BILAN", sont utilisés comme valeurs de *CRIT1* et *CRIT2*.

### 6.2 PRINCIPES DE L'OPTIMISATION

Le but étant d'atteindre au mieux l'objectif de gestion, tout en évitant de trop solliciter certains réservoirs pour ne pas pénaliser d'autres objectifs éventuels, on cherche à déterminer une clé de répartition du stockage entre réservoirs qui minimise, au choix (voir ci-dessous), *CRIT1* ou *CRIT2* considéré comme critère principal *CRITP*, tout en minimisant si possible l'autre critère parmi *CRIT1* et *CRIT2*, considéré comme critère secondaire *CRITS*.

Si une valeur entière de 1 (valeur par défaut) ou 2 peut être lue dans le fichier "PAROPT.TXT" pour le paramètre *Sens* (voir § 6.3.1), alors :

- Si  $Sens=1$ , alors  $CRITP=CRIT1$  et  $CRITS=CRIT2$ . Le programme minimise alors prioritairement les défaillances et secondairement les taux de sollicitation ;
- Si  $Sens=2$ , alors  $CRITS=CRIT1$  et  $CRITP=CRIT2$ . Le programme minimise alors prioritairement les taux de sollicitation et secondairement les défaillances.

### 6.2.1 Analyse de sensibilité

Dans un premier temps, la procédure établit un classement des réservoirs concernés par l'objectif de gestion, en fonction de la sensibilité des critères  $CRITP$  et  $CRITS$  vis-à-vis de la variation des valeurs fictives de leurs volumes exploitables autour des valeurs réelles.

Un écart standard  $\Delta P$  de la part relative des différents réservoirs sur l'ensemble des volumes exploitables est d'abord calculé ainsi, en notant  $i$  le rang des réservoirs et  $VT$  la somme des volumes exploitables réels  $V_{tot}$  des différents réservoirs :

$$\Delta P = Teil \times \min(\min(V_{tot_i} / VT) ; 1 - \max(V_{tot_i} / VT))$$

Dans cette formule,  $Teil$  est une constante dont la valeur par défaut (0.5) peut être modifiée si nécessaire. Il suffit pour cela que le répertoire "PARAMETR" contienne un fichier texte nommé "PAROPT.TXT", configuré de façon adéquate (cf § **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**)

Le programme VGEST est ensuite appliqué en utilisant successivement  $2K$  clés de répartition différentes du débit à stocker, de la façon suivante :

Pour  $n$  variant de 1 à  $K$  (nombre de réservoirs concernés) :

- VGest produit les critères  $CRITP(n,1)$  et  $CRITS(n,1)$  avec le jeu de volumes exploitables fictifs  $VR_{tot}$  défini ainsi :
  - $VR_{tot}(n) = V_{tot}(n) + \Delta P \times VT$  [151]
  - $VR_{tot}(m) = V_{tot}(m) \times (VT - VR_{tot}(n)) / (VT - V_{tot}(n))$  pour  $m \neq n$  [152]
- VGest produit les critères  $CRITP(n,2)$  et  $CRITS(n,2)$  avec le jeu de volumes exploitables fictifs  $VR_{tot}$  défini ainsi :
  - $VR_{tot}(n) = V_{tot}(n) - \Delta P \times VT$  [153]
  - $VR_{tot}(m) = V_{tot}(m) \times (VT - VR_{tot}(n)) / (VT - V_{tot}(n))$  pour  $m \neq n$  [154]
- La sensibilité  $SENSP$  et  $SENSS$  des critères  $CRITP$  et  $CRITS$  vis-à-vis de la variation du volume exploitable fictif du réservoir  $i$  est calculée ainsi :
  - $SENSP(n) = \text{abs}(CRITP(n,1) - CRITP(n,2))$  [155]
  - $SENSS(n) = \text{abs}(CRITS(n,2) - CRITS(n,2))$  [156]

Les réservoirs sont ensuite comparés deux à deux pour les classer par sensibilité décroissante des critères  $CRITP$  et  $CRITS$  vis-à-vis de la variation de leur volume exploitable fictif  $VR_{tot}$ . Cette comparaison est effectuée ainsi entre deux réservoirs de rang  $n$  et  $m$  :

- Si  $SENSP(m) > SENSP(n)$  alors le réservoir de rang  $m$  est classé avant le réservoir de rang  $n$
- Si  $SENSP(n) > SENSP(m)$  alors le réservoir de rang  $n$  est classé avant le réservoir de rang  $m$
- Si  $SENSP(m) = SENSP(n)$  alors :
  - Si  $SENSS(m) > SENSS(n)$  alors le réservoir de rang  $m$  est classé avant le réservoir de rang  $n$
  - Si  $SENSS(n) > SENSS(m)$  alors le réservoir de rang  $n$  est classé avant le réservoir de rang  $m$
  - Si  $SENSS(m) = SENSS(n)$  alors le réservoir de plus petit rang parmi  $m$  et  $n$  est arbitrairement classé avant l'autre

### **6.2.2 Détermination de la clé de répartition optimale des débits stockés entre réservoirs**

Les réservoirs sont examinés les uns après les autres selon le classement établi ci-dessus, pour optimiser successivement leur volume exploitable fictif  $VR_{tot}$ . A toutes les étapes de ce calcul, la somme des volumes  $VR_{tot}$  est imposée égale à la somme  $VT$  des volumes exploitables réels  $V_{tot}$ , pour éviter d'augmenter inutilement le nombre de degrés de liberté du problème à résoudre. De ce fait, l'optimisation ne concerne que les  $K-1$  premiers réservoirs du classement établi en fonction des sensibilités, dont la somme des volumes  $VR_{tot}$  optimisés détermine automatiquement le volume  $VR_{tot}$  du dernier réservoir par différence avec  $VT$ .

L'optimisation du volume  $VR_{tot}$  d'un réservoir donné tient compte du fait qu'une telle optimisation a déjà été menée éventuellement pour d'autres réservoirs. On note respectivement  $VTT$  et  $VRTT$  les sommes des volumes exploitables réels  $V_{tot}$  et fictifs optimisés  $VR_{tot}$  concernant ces réservoirs déjà traités. Pour les réservoirs qui n'ont pas encore été traités, la somme des volumes  $VRT_{tot}$  restant à optimiser vaut donc  $VT - VRTT$ .

Le traitement d'un nouveau réservoir de rang  $n$  vise à optimiser la part  $R = VR_{tot}(n)/(VT - VRTT)$ , comprise entre 0 et 1, de son volume exploitable fictif par rapport à la somme des volumes exploitables fictifs des réservoirs qui n'ont pas encore été traités. La détermination de l'optimum est faite par un processus dichotomique, au début de chaque étape duquel sont considérées les trois valeurs suivantes de  $R$  déterminées par l'étape précédente :

- $R_{min}$  : borne inférieure de l'intervalle de valeurs de  $R$  à explorer ( $R_{min} = 0$  au début de la première étape)
- $R_{max}$  : borne supérieure de l'intervalle de valeurs de  $R$  à explorer ( $R_{max} = 1$  au début de la première étape)
- $R_{opt}$  : valeur de  $R$  ayant donné les meilleurs résultats pour les critères  $CRITP$  et  $CRITS$ , parmi les valeurs testées dans les étapes précédentes. Au début de la première étape,  $R_{opt}$  est arbitrairement fixé proportionnellement au volume exploitable  $V_{tot}(n)$  du réservoir ( $VR_{tot}(n) = V_{tot}(n) \times (VT - VRTT)/(VT - VTT)$ , comme pour chacun des réservoir qui n'a pas encore été traité).

A partir de ces trois valeurs de  $R$ , la procédure détermine ainsi une nouvelle valeur  $R_{nouv}$  de  $R$  à tester pour le réservoir de rang  $n$  :

- $R_{Nouv} = (R_{opt} \times Rel + R_{max}) / (1 + Rel)$  si  $(R_{max} - R_{opt}) > (R_{opt} - R_{min})$  [157]

- $R_{Nouv} = (R_{opt} \times Rel + R_{min}) / (1 + Rel)$  si  $(R_{max} - R_{opt}) \leq (R_{opt} - R_{min})$  [158]

Dans ces relations,  $Rel$  est une constante supérieure ou égale à 1 dont la valeur par défaut (égale à 1) peut être modifiée si nécessaire par une configuration adéquate du fichier texte "PAROPT.TXT" dans le répertoire "PARAMETR" (cf § **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

A la nouvelle valeur  $R_{nouv}$  de la part relative attribuée au réservoir de rang  $n$  sont associées les valeurs  $VR_{tot}$  suivantes pour les réservoirs dont la part n'a pas encore été optimisée ;

- $VR_{tot}(n) = R_{nouv} \times (VT - VR_{TT})$  pour le réservoir de rang  $n$  en cours de traitement
- $VR_{tot}(m) = V_{tot}(m) \times (VT - VR_{TT} - VR_{tot}(n)) / (VT - V_{TT} - V_{tot}(n))$  pour les réservoirs de rang  $m$  qui n'ont pas encore été traités, autres que le réservoir de rang  $n$  en cours de traitement.

Pour déterminer si l'optimisation de  $VR_{tot}(n)$  doit être arrêtée (convergence atteinte) ou au contraire poursuivie, l'écart obtenu entre  $R_{nouv}$  et  $R_{opt}$  est alors comparé à la constante  $Seuil$ , dont la valeur par défaut (égale à 0.001) peut être modifiée par une configuration adéquate du fichier "PAROPT.TXT" dans le répertoire "PARAMETR" (cf § **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Le processus est arrêté si  $abs(R_{nouv} - R_{opt}) < Seuil$ . Dans le cas contraire, il est poursuivi en commençant par une comparaison des résultats obtenus avec  $R_{nouv}$  et  $R_{opt}$  menée selon le principe suivant, dans le but de déterminer quelle est la meilleure de ces deux valeurs de  $R$  :

- Si  $CRITP(R_{nouv}) > CRITP(R_{opt})$  alors  $R_{opt}$  est meilleur que  $R_{nouv}$
- Si  $CRITP(R_{opt}) > CRITP(R_{nouv})$  alors  $R_{nouv}$  est meilleur que  $R_{opt}$
- Si  $CRITP(R_{opt}) = CRITP(R_{nouv})$  alors :
  - Si  $CRITS(R_{nouv}) > CRITS(R_{opt})$  alors  $R_{opt}$  est meilleur que  $R_{nouv}$
  - Si  $CRITS(R_{opt}) > CRITS(R_{nouv})$  alors  $R_{nouv}$  est meilleur que  $R_{opt}$
  - Si  $CRITS(R_{opt}) = CRITS(R_{nouv})$  alors  $R_{nouv}$  est meilleur que  $R_{opt}$  si et seulement si  $R_{nouv}$  est plus proche que  $R_{opt}$  de la valeur initiale  $V_{tot}(n) \times (VT - VR_{TT}) / (VT - V_{TT})$

Les résultats de cette comparaison conduisent alors à déterminer un nouveau triplet de valeurs  $R_{min}$ ,  $R_{opt}$ ,  $R_{max}$  qui resserre l'intervalle  $[R_{min}, R_{max}]$ , de la façon suivante :

- Si  $R_{opt}$  est meilleur que  $R_{nouv}$  alors :
  - Si  $R_{nouv} > R_{opt}$  alors :  $R_{min}$  et  $R_{opt}$  restent inchangés ;  $R_{max}$  prend comme nouvelle valeur celle de  $R_{nouv}$
  - Si  $R_{nouv} < R_{opt}$  alors :  $R_{min}$  prend comme nouvelle valeur celle de  $R_{nouv}$  ;  $R_{opt}$  et  $R_{max}$  restent inchangés

- Si  $R_{nouv}$  est meilleur que  $R_{opt}$  alors :
  - Si  $R_{nouv} > R_{opt}$  alors :  $R_{min}$  prend comme nouvelle valeur celle de  $R_{opt}$  ;  $R_{opt}$  prend comme nouvelle valeur celle de  $R_{nouv}$  ;  $R_{max}$  reste inchangé
  - Si  $R_{nouv} < R_{opt}$  alors :  $R_{min}$  reste inchangé ;  $R_{max}$  prend comme nouvelle valeur celle de  $R_{opt}$  ;  $R_{opt}$  prend comme nouvelle valeur celle de  $R_{nouv}$

La procédure passe alors à l'étape suivante de la dichotomie.

## 6.3 EXÉCUTION DU PROGRAMME SURVGEST.BAT

La première opération effectuée par le programme consiste à effacer, s'il existe, un fichier nommé "FINIFINI" dans le répertoire contenant VGEST.EXE et SURVGEST.BAT.

Le programme effectue ensuite ses calculs en fonction du paramétrage choisi par l'utilisateur et édite ses résultats sur fichiers (voir ci-dessous). Sa dernière opération consiste à créer puis fermer le fichier "FINIFINI" mentionné ci-dessus, qui peut donc être utilisé pour contrôler le déroulement de SURVGEST.BAT de façon automatique.

### 6.3.1 Paramétrage du calcul

En pratique, SURVGEST pilote une série de lancements successifs des programmes REGLAGE.EXE et VGEST.EXE, le premier analysant les résultats obtenus par le second pour définir une nouvelle clé de répartition du stockage à tester, et le second basant ses calculs sur cette nouvelle clé. Les options de calcul de VGEST (station aval, objectif, etc.) devant rester constantes pendant ce processus, il est impératif de permettre au programme de lire ces options sur fichier plutôt que de les saisir au clavier, en configurant au préalable les fichiers "MODE.TXT" et "CHOIX.TXT" de façon adéquate (cf § 5.4).

Il est par ailleurs possible d'imposer les valeurs des paramètres *Teil*, *Rel*, *Seuil*, *Sens* et *QuelChron* (cf § **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) utilisées par l'optimisation, en plaçant celles-ci dans cet ordre et à raison d'une valeur par ligne dans un fichier nommé "PAROPT.TXT" situé dans le répertoire PARAMETR :

- *Teil* (imposé entre 0.1 et 0.9 par le programme REGLAGE.EXE, et valant 0.5 par défaut) intervient dans l'analyse de sensibilité. Plus *Teil* est grand, plus on élargit le domaine d'analyse de sensibilité autour de la répartition standard ;
- *Rel* (imposé supérieur ou égal à 1 par le programme REGLAGE.EXE, et valant 1 par défaut) intervient dans l'optimisation de répartition par dichotomie. Plus *Rel* est grand, plus on contraint la recherche de nouvelles répartitions optimales à s'éloigner lentement de la répartition standard ;
- *Seuil* (imposé entre 0.000001 et 0.1 par le programme REGLAGE.EXE, et valant 0.001 par défaut) est le seuil de convergence dans l'optimisation de la part du réservoir courant rapportée à la part totale des réservoirs qui n'ont pas encore été traités ;

- *Sens* (entier entre 1 et 2 (1 par défaut)). Si *Sens*=1, alors le critère principal à minimiser représente les défaillances *QXdef2* et le critère secondaire représente les taux de sollicitation ; Si *Sens*=2 , c'est l'inverse ;
- *QuelChron* (entier entre 1 et 3 (3 par défaut)). Si *QuelChron* vaut 1, 2 ou 3, les critères utilisés correspondent aux résultats de calcul en sens chronologique inverse, en sens chronologique normal ou à la moyenne des deux, respectivement.

Si le fichier "PAROPT.TXT" n'existe pas ou si le programme ne parvient pas à lire correctement les cinq valeurs, les calculs utilisent les valeurs par défaut des paramètres.

### **6.3.2 Résultats**

Après l'exécution du programme SURVGEST.BAT, le répertoire RESULTAT contient les résultats produits par VGEST.EXE (cf § 5.5) avec la clé de répartition optimale des débits stockés entre réservoirs. Le fichier "SUIVI.TXT" placé dans le répertoire "SUIVOPTI" donne par ailleurs les valeurs des critères *CRITP* et *CRITS* successivement obtenues pour toutes les clés de répartition testées pendant l'optimisation.

## 7 COMPARAISON DE RÉSULTATS OBTENUS AVEC LES DIFFÉRENTS MODES DE RÉPARTITION DES TÂCHES ENTRE RÉSERVOIRS.

La comparaison des résultats obtenus suivant différentes méthodes est effectuée pour les deux objectifs théoriques de gestion suivants, localisés à Paris dans la Seine : soutien d'étiage à 125 m<sup>3</sup>/s et laminage de crue à 800 m<sup>3</sup>/s.

Les calculs sont effectués sur la période 1900-2009 à partir des données du régime naturel observé (fichier "data\_re1.txt"), avec prise en compte des règles de débit réservé aux prises des réservoirs Seine, Aube et Marne et à la restitution du réservoir Yonne. Les débits de référence locaux ne sont pas pris en compte.

ATTENTION : La valeur retenue ici pour le volume total exploitable  $V_{tot}$  du réservoir Yonne est 74.37 hm<sup>3</sup> (au lieu de 74 hm<sup>3</sup>, valeur retenue dans le projet d'article).

Les méthodes comparées sont, d'une part, celle qui avait été mise au point pour le programme Climaware (méthode 0) et, d'autre part, celles dont la théorie est décrite plus haut (méthodes 1 à 9, voir § 4.4.1) :

- méthode 0 : la répartition des tâches entre réservoirs est figée et faite au meilleur prorata possible des volumes totaux exploitables  $V_{tot}$  des réservoirs, en tenant compte des limitations de débit stocké imposées par les contraintes physiques et consignes de gestion aux prises et restitutions. Cette répartition ne tient pas compte du volume d'eau présent dans chaque réservoir ;
- méthodes 1 à 9 : la répartition est faite suivant les modes 1 à 5 décrits plus haut (§ 4.4.1), en tenant compte des limitations de débit stocké imposées par les contraintes physiques et consignes aux prises et restitutions et par les volumes d'eau présents dans les réservoirs :
  - méthode 1 : la répartition est figée (mode 1, voir § 4.4.1.1) et faite au meilleur prorata possible des volumes totaux exploitables  $V_{tot}$  des réservoirs
  - méthode 2 : la répartition est variable et faite du mieux possible en fonction des volumes d'eau présents  $V$  dans les réservoirs et des durées potentielles minimales  $T_{pot}$  de reconstitution de leurs volumes utilisables maximaux (mode 2, voir § 4.4.1.2)
  - méthode 3 : la répartition est variable et vise à équilibrer du mieux possible les taux de remplissage  $V/V_{tot}$  entre les réservoirs (mode 3, voir § 4.4.1.3)
  - méthode 4 : la répartition est variable et vise à équilibrer du mieux possible les durées potentielles minimales  $T_{pot1}$  de reconstitution du volume utilisable maximal des réservoirs, ces durées étant calculées pour des valeurs constantes (moyennes) des débits des cours d'eau aux prises (mode 4, voir § 4.4.1.4);
  - méthode 5 : la répartition est variable et vise à équilibrer du mieux possible les durées potentielles minimales  $T_{pot2}$  d'épuisement du volume utilisable des

réservoirs, ces durées étant calculées pour des valeurs constantes (moyennes) des débits des cours d'eau aux prises (mode 4, voir § 4.4.1.4) ;

- méthode 6 : la répartition est variable et vise à équilibrer du mieux possible les durées potentielles minimales  $T_{pot1}$  de reconstitution du volume utilisable maximal des réservoirs, ces durées étant calculées pour des valeurs variables (hydrogrammes annuels isofréquence de fréquence 0.5) des débits des cours d'eau aux prises (mode 5, voir § 4.4.1.5) ;
- méthode 7 : la répartition est variable et vise à équilibrer du mieux possible les durées potentielles minimales  $T_{pot2}$  d'épuisement du volume utilisable des réservoirs (mode 4, voir § 4.4.1.4), ces durées étant calculées pour des valeurs variables (hydrogrammes annuels isofréquence de fréquence 0.5) des débits des cours d'eau aux prises (mode 5, voir § 4.4.1.5) ;
- méthode 8 : la répartition est figée (mode 1, voir § 4.4.1.1) et faite du mieux possible suivant une clé de répartition optimisée pour minimiser prioritairement les défaillances  $QX_{def2}$  et secondairement les taux de sollicitation des réservoirs ( $CRITP=CRIT1$  et  $CRITS=CRIT2$ , voir § 6.2) ;
- méthode 9 : la répartition est figée (mode 1, voir § 4.4.1.1) et faite du mieux possible selon une clé de répartition optimisée pour minimiser prioritairement les taux de sollicitation des réservoirs et secondairement les défaillances  $QX_{def2}$  ( $CRITP=CRIT2$  et  $CRITS=CRIT1$ , voir § 6.2) ;

## 7.1 COMPARAISON DES MÉTHODES 0 ET 1 : INTÉRÊT DE LA PRISE EN COMPTE DES VOLUMES D'EAU PRÉSENTS POUR LA RÉPARTITION DES TÂCHES ENTRE RÉSERVOIRS

La version du programme Vgest implémentant la méthode 0 et développée pour le programme Climaware édite des résultats moins complets que la version actuelle (§ 5.5). De ce fait, la comparaison des méthodes 0 et 1 porte uniquement sur les défaillances totales  $QX_{def1}$  obtenues en sens chronologique inverse.

### 7.1.1 Soutien d'étiage

Sur les 40112 débits journaliers obtenus à la station aval, la méthode 0 présente 230 défaillances  $QX_{def1}(T)$  non nulles (soit 0.57 % du temps), dont 54 (soit 0.13 % du temps) ont une valeur résultant (partiellement ou en totalité) d'une répartition inadéquate des tâches entre les réservoirs, caractérisée par des débits stockés  $QST_i(T-D_i)$  supérieurs aux débits minimaux  $QST_{min3}(T-D_i)$  dans au moins un des réservoirs. Ceci est dû au fait que la répartition affecte parfois à certains réservoirs des débits stockés incompatibles avec leurs taux de remplissage, alors que ces débits pourraient être pris en charge par d'autres réservoirs, en partie ou en totalité.

On peut donc logiquement espérer que la méthode 1, qui diffère de la méthode 0 en tenant compte des volumes d'eau présents dans le calcul de répartition des tâches entre réservoirs, améliore globalement les résultats obtenus, en particulier pour les jours concernés par les 54 défaillances évoquées ci-dessus. Cependant, on ne peut exclure que la méthode 1 puisse aussi aggraver certaines défaillances ou en ajouter de nouvelles par rapport à la méthode 0, puisqu'une meilleure utilisation du volume utilisable un jour donné peut éventuellement

entraîner un manque pour un autre jour. Seule la comparaison globale des résultats peut permettre de conclure.

On constate (fig. 7.1.A (a et b)) que pour les 54 jours concernés par des défaillances dues à une répartition défaillante des tâches par la méthode 0, la méthode 1 fait systématiquement diminuer ces défaillances. Elle entraîne par contre une aggravation de 2 défaillances qui présentaient déjà une valeur élevée avec la méthode 0. La fonction de répartition globale de  $QX_{def1}$  (fig. 7.1.A (c)), nettement plus élevée avec la méthode 0 pour les valeurs faibles et légèrement plus élevée avec la méthode 1 pour les valeurs fortes, est globalement très proche pour les deux méthodes. La défaillance  $QX_{def1}$  présente respectivement une moyenne de  $0.22431 \text{ m}^3/\text{s}$  et une moyenne quadratique de  $3.8526 \text{ m}^3/\text{s}$  avec la méthode 0, et de  $0.22196$  et  $3.8527 \text{ m}^3/\text{s}$  avec la méthode 1.

Pour l'objectif de soutien d'étiage envisagé, les résultats obtenus sont globalement meilleurs avec la méthode 1 qu'avec la méthode 0.

### **7.1.2 Laminage de crue**

Sur les 40112 débits journaliers obtenus à la station aval, la méthode 0 présente 1148 défaillances  $QX_{def1}$  non nulles (soit 2.9% du temps), dont 76 (soit 0.19 % du temps) ont une valeur due (partiellement ou en totalité) au fait que la répartition des tâches ne tient pas compte des volumes d'eau présents dans les réservoirs. En effet, chacune de ces 76 défaillances  $QX_{def1}(T)$  résulte de débits stockés  $QST_i(T-D_i)$  qui, dans au moins un des quatre réservoirs, sont inférieurs aux débits maximaux  $QST_{max3}(T-D_i)$  permis par les contraintes physiques et consignés aux prises et restitutions et par les volumes d'eau présents.

Comme pour l'objectif de soutien, la méthode 1 doit permettre de réaliser au mieux l'objectif de laminage en évitant, à chaque pas de temps, une répartition inadéquate des tâches. Mais là encore, une meilleure utilisation du volume utilisable un jour donné peut éventuellement entraîner une aggravation de défaillance pour un autre jour, et seule la comparaison globale des résultats obtenus avec les méthodes 0 et 1 peut permettre de conclure.

On constate (fig. 7.1.B (a)) que sur les 76 jours concernés par des défaillances dues à une répartition inadéquate des tâches par la méthode 0, la méthode 1 fait diminuer ces défaillances pour 71 jours et les fait augmenter pour les 5 jours restants. Sur ces 76 jours, la fonction de répartition de  $QX_{def1}$  est systématiquement supérieure avec la méthode 0, comparée à la méthode 1 (fig. 7.1.B (b)).

Par ailleurs, sur l'ensemble des 505 jours présentant des valeurs de défaillances  $QX_{def1}$  différentes pour les méthodes 0 et 1, la méthode 1 donne des défaillances inférieures 385 fois et supérieures 120 fois (fig. 7.1.B (a)).

Enfin, malgré des fonctions de répartition globales très proches pour les deux méthodes (fig. 7.1.B (c)), les défaillances  $QX_{def1}$  obtenues avec la méthode 1 (moyenne = 6.449 ; moyenne quadratique = 53.157) sont globalement inférieures à celles qui sont obtenues avec la méthode 0 (moyenne = 6.500 ; moyenne quadratique = 53.206).

Pour l'objectif de laminage de crue envisagé, les résultats obtenus sont globalement meilleurs avec la méthode 1 qu'avec la méthode 0.

### **7.1.3 Conclusion**

En ne tenant pas compte des volumes d'eau présents dans les réservoirs pour répartir l'objectif de débit stocké, la méthode 0 assigne parfois à certains réservoirs des débits stockés incompatibles avec leur taux de remplissage, alors même que d'autres réservoirs pourraient prendre en charge ces débits, partiellement ou en totalité. La méthode 1, qui estime à chaque pas de temps les limites de débit stocké possible dans chaque réservoir en tenant compte du volume d'eau présent, permet d'éviter ces répartitions inadéquates. Cette méthode améliore les résultats obtenus en chronologie inverse en faisant diminuer globalement les défaillances, à la fois pour l'objectif de laminage de crue et pour l'objectif de soutien d'étiage envisagés.

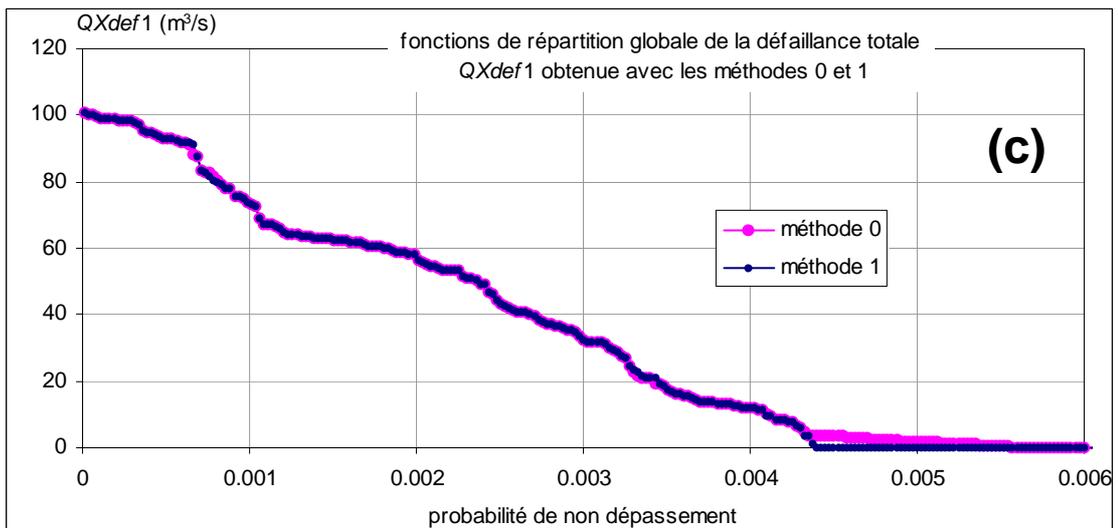
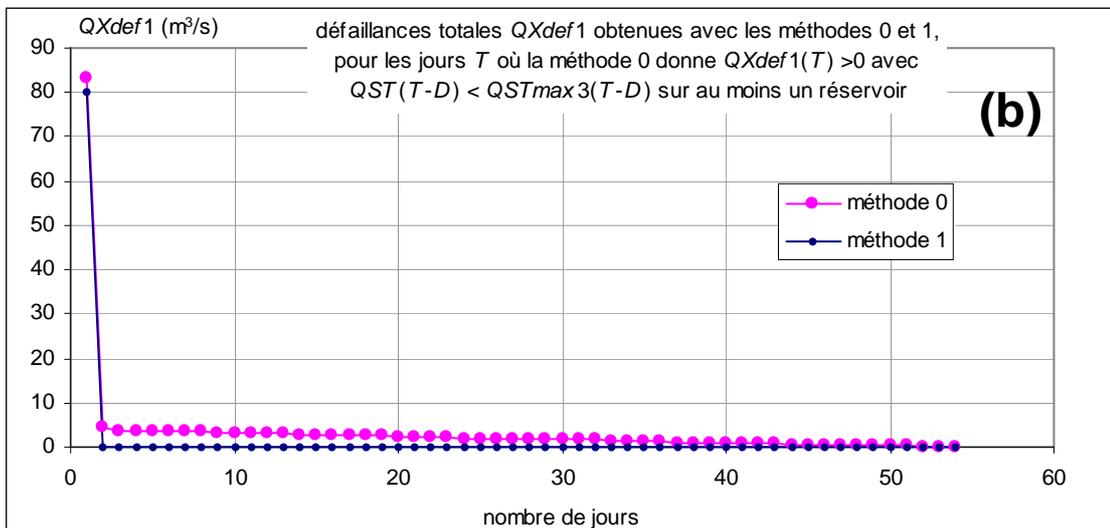
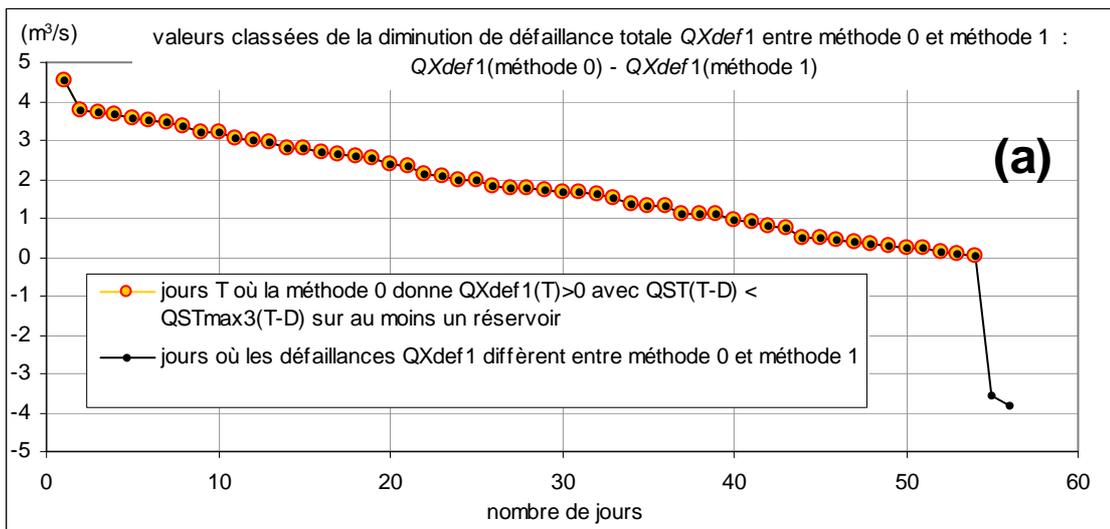


Figure 7.1.A : comparaison des défaillances totales  $QX_{def1}$  obtenues par les méthodes 0 et 1 dans le cas d'un objectif de soutien d'étiage à  $125 \text{ m}^3/\text{s}$  dans la Seine à Paris sur la période 1900-2009 (résultats obtenus en chronologie inverse)

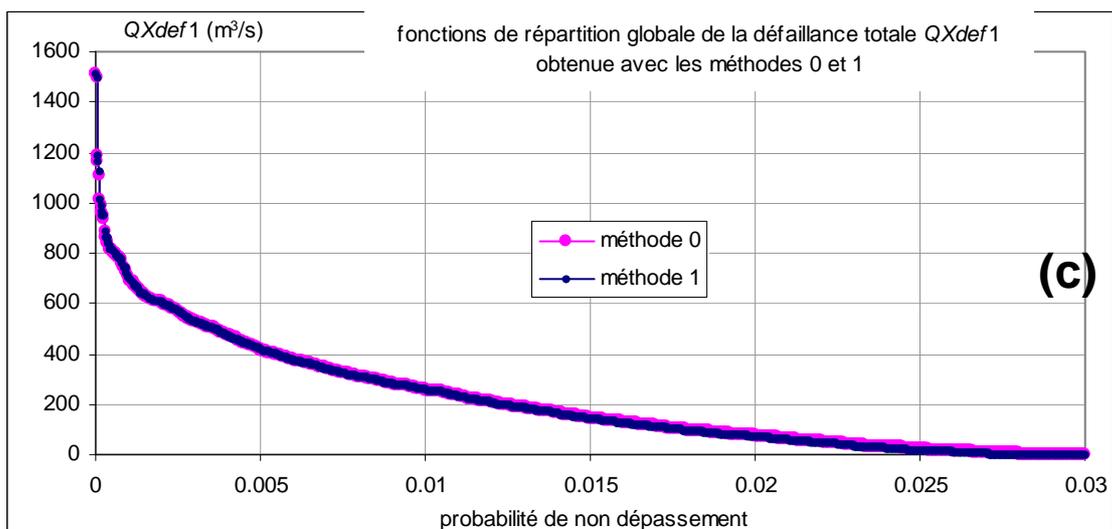
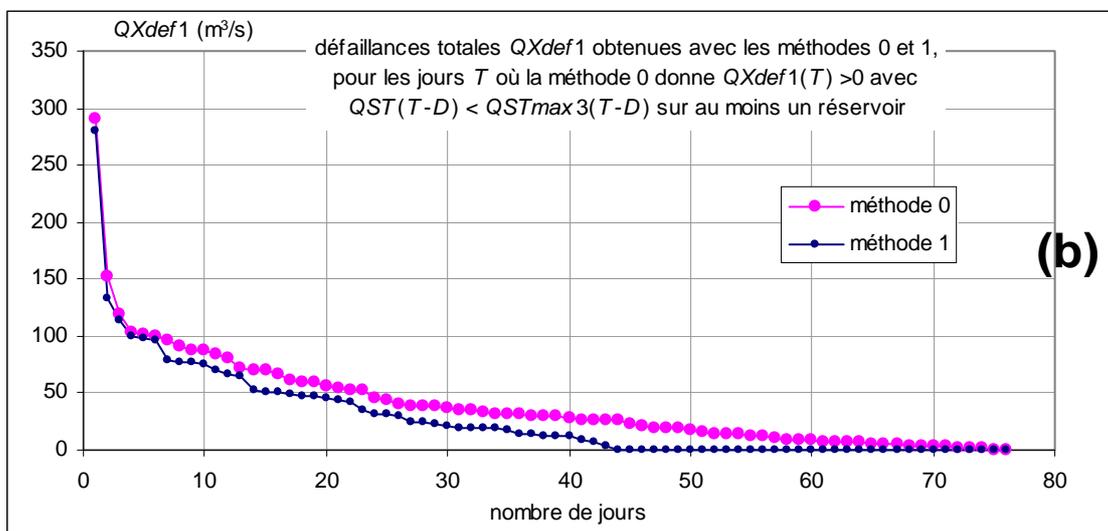
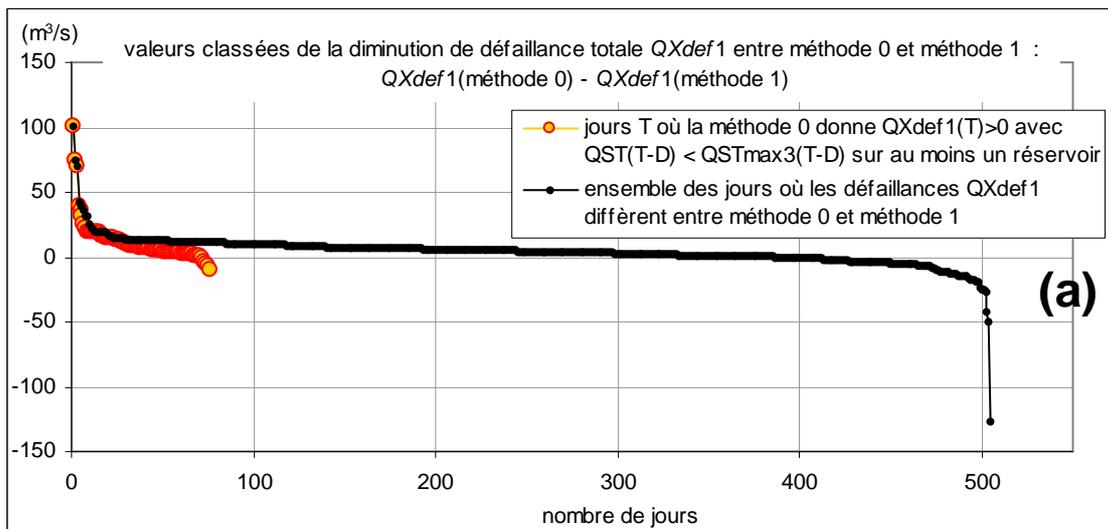


Figure 7.1.B : comparaison des défaillances totales  $QX_{def1}$  obtenues par les méthodes 0 et 1 dans le cas d'un objectif de laminage de crue à  $800 \text{ m}^3/\text{s}$  dans la Seine à Paris sur la période 1900-2009 (résultats obtenus en chronologie inverse)

## 7.2 COMPARAISON DE TOUTES LES MÉTHODES

Les méthodes sont comparées à partir des indicateurs suivants, dont les valeurs obtenues pour l'objectif de soutien d'étiage et l'objectif de laminage de crue sont représentées respectivement sur les figures 7.2.A et 7.2.B :

- moyenne, pour chaque réservoir, des taux moyens quadratiques de sollicitation obtenus en sens chronologique et en chronologie inverse. On souhaite que les valeurs de cet indicateur soient relativement équilibrées entre les réservoirs, avec une valeur maximale la moins élevée possible, pour ne pas pénaliser d'éventuels objectifs de gestion concurrentiels.
- valeurs maximales de volume manquant relatif  $V_{def}/\sum V_{tot}$  obtenues en sens chronologique et en chronologie inverse, ainsi que leur moyenne. On souhaite que cet indicateur soit le moins élevé possible puisqu'il correspond à la capacité supplémentaire nécessaire sur l'ensemble des réservoirs pour limiter les défaillances aux seules défaillances inévitables absolues (dues aux limites de débit stocké imposées par les contraintes physiques et consignes de gestion aux prises et restitutions) ;
- moyennes quadratiques de défaillance  $QX_{def1}$  obtenues en sens chronologique et en chronologie inverse, ainsi que leur moyenne. On souhaite que cet indicateur soit le plus petit possible pour minimiser surtout les fortes défaillances ;
- moyennes de défaillance  $QX_{def1}$  obtenues en sens chronologique et en chronologie inverse, ainsi que leur moyenne. On souhaite que cet indicateur soit le plus petit possible pour minimiser l'ensemble des défaillances.

La méthode 8 présente les plus fortes moyennes de  $QX_{def1}$ , à la fois pour le laminage de crue et le soutien d'étiage. Elle se distingue également par des taux de sollicitation très inégaux entre réservoirs, avec les plus fortes valeurs maximales pour ces deux objectifs, ainsi que des volumes manquants parmi les plus forts pour l'objectif de laminage. Pour ces raisons, et bien qu'elle donne les plus petites moyennes quadratiques de  $QX_{def1}$  pour les deux objectifs, cette méthode ne peut pas être considérée parmi les meilleures.

La méthode 0, moins performante que la méthode 1 pour les résultats obtenus en chronologie inverse (cf § 7.1), se distingue également, pour l'objectif de laminage, par le plus fort volume manquant (évalué seulement en chronologie inverse) et la plus forte moyenne de défaillance  $QX_{def1}$ . Cette méthode n'est donc pas non plus parmi les meilleures.

La méthode 9 est moins performante, en moyenne sur les deux sens de calcul et pour les deux objectifs, que les méthodes 4 et 6 pour le volume manquant, la moyenne quadratique de  $QX_{def1}$  et la moyenne de  $QX_{def1}$ . Elle n'est donc pas conservée pour le choix de la meilleure méthode.

Comparée à la méthode 4 en moyenne sur les deux sens de calcul et pour les deux objectifs, la méthode 1 est légèrement plus performante pour la moyenne de  $QX_{def1}$ , mais nettement moins performante pour le taux de sollicitation maximal, le volume manquant et surtout la moyenne quadratique de  $QX_{def1}$ . Elle est donc à son tour écartée.

Les méthodes restantes présentent toutes des résultats assez proches pour les indicateurs de défaillances. Parmi elles, on écarte la méthode 2 qui se distingue par un taux de sollicitation maximal beaucoup plus élevé que les autres pour l'objectif de soutien, ainsi que

la méthode 7 qui présente un volume manquant beaucoup plus élevé que les autres pour l'objectif de laminage.

Ce sont finalement les méthodes 3 à 6 qui se montrent les plus performantes pour les deux types d'objectifs, au vu des différents indicateurs. Parmi celles-ci, la méthode 4 peut être considérée comme la meilleure puisqu'elle donne les meilleurs résultats pour la moyenne quadratique des défaillances  $QX_{def1}$  et pour les taux de sollicitation maximaux des réservoirs.

Bien que les valeurs obtenues pour les indicateurs diffèrent relativement peu entre les méthodes utilisées, ces dernières produisent des chronogrammes annuels iso-fréquence avec des différences visibles, comme l'illustrent les figures 7.2.C et 7.2.D pour les méthodes 0 (utilisée pour le programme Climaware), 4 (la meilleure) et 5 (parmi les meilleures).

### **7.3 CONCLUSION**

Les tests effectués pour des objectifs de soutien d'étiage à 125 m<sup>3</sup>/s ou de laminage de crue à 800 m<sup>3</sup>/s dans la Seine à Paris montrent que les meilleurs résultats sont obtenus avec la méthode 4, qui correspond au mode 4 de répartition des tâches entre réservoirs, visant à équilibrer leurs durées potentielles minimale  $T_{pot1}$  de reconstitution du volume utilisable maximal, calculées pour des écoulements moyens.

Pour autant, on ne peut en déduire que la méthode 4 soit forcément la meilleure dans tous cas de figure. Les autres méthodes, qui donnent des résultats somme toute assez proches pour les tests effectués, sont donc maintenues dans le programme VGEST.

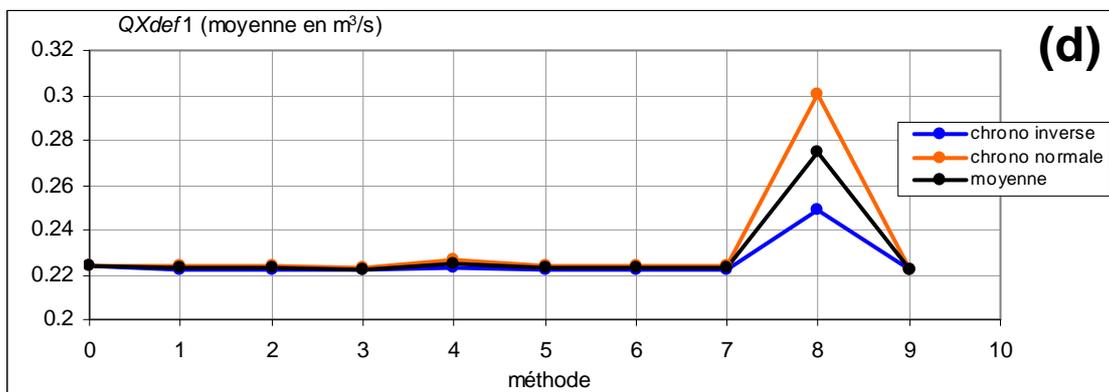
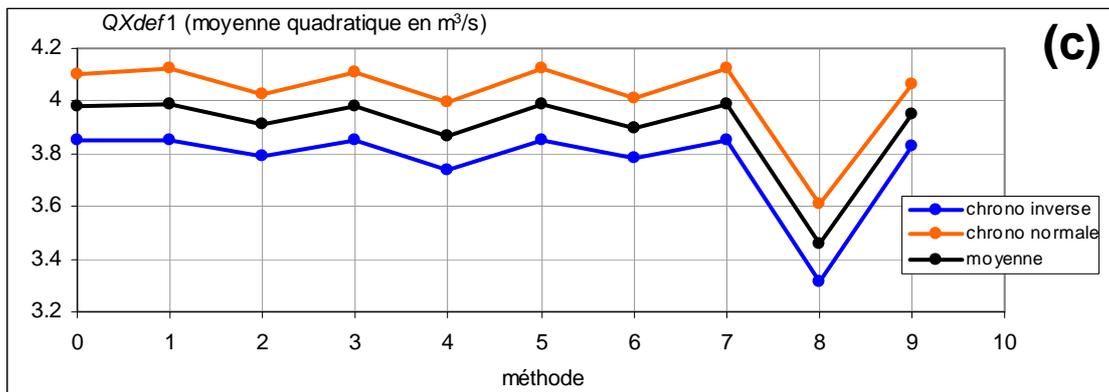
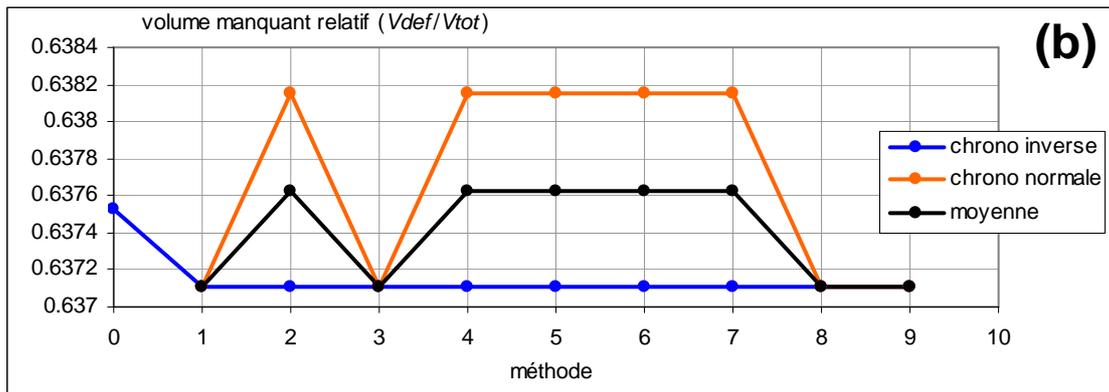
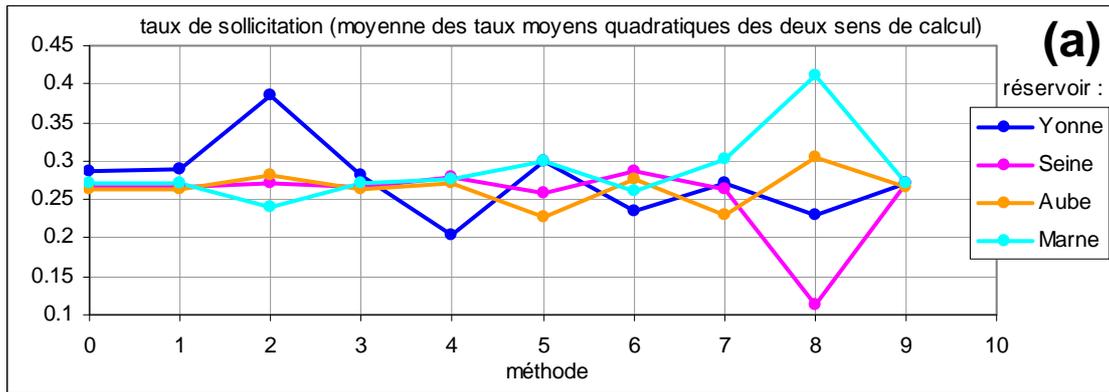


Figure 7.2.A : valeurs des taux de sollicitation des réservoirs, du volume manquant relatif et de la défaillance totale de débit obtenues avec les différentes méthodes pour l'objectif de soutien d'étiage de la Seine à Paris à  $125 m^3/s$

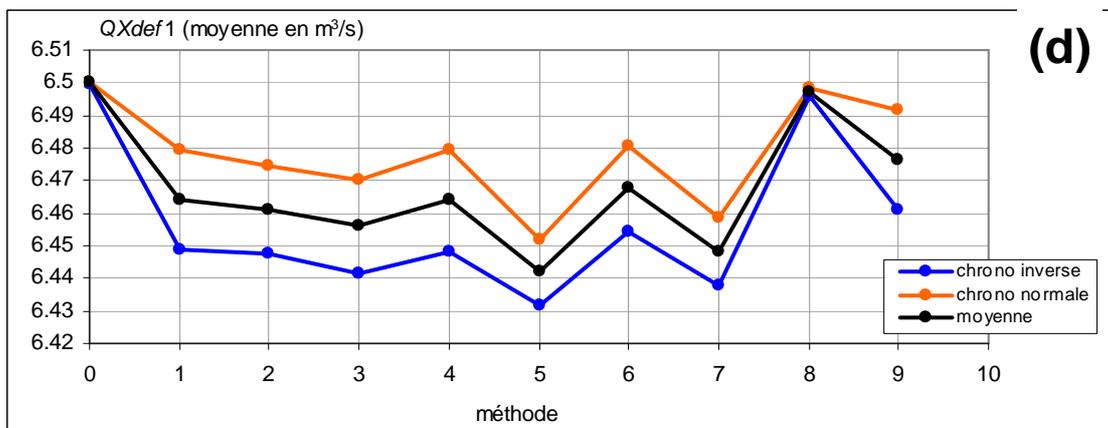
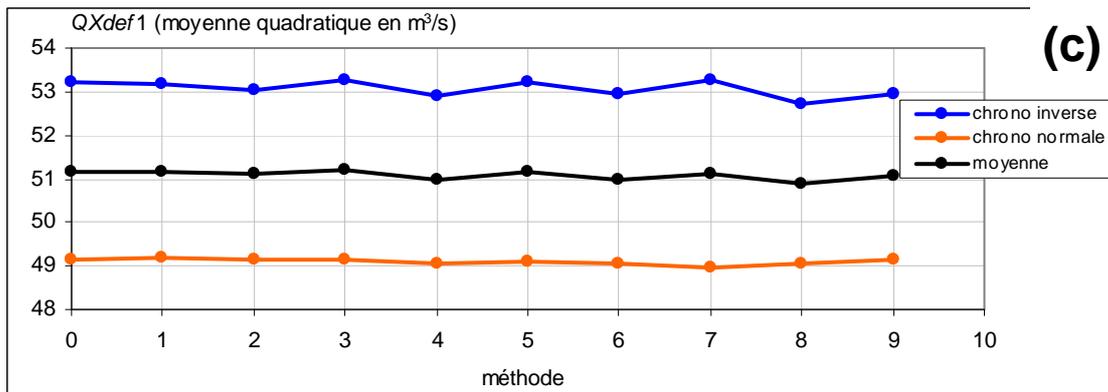
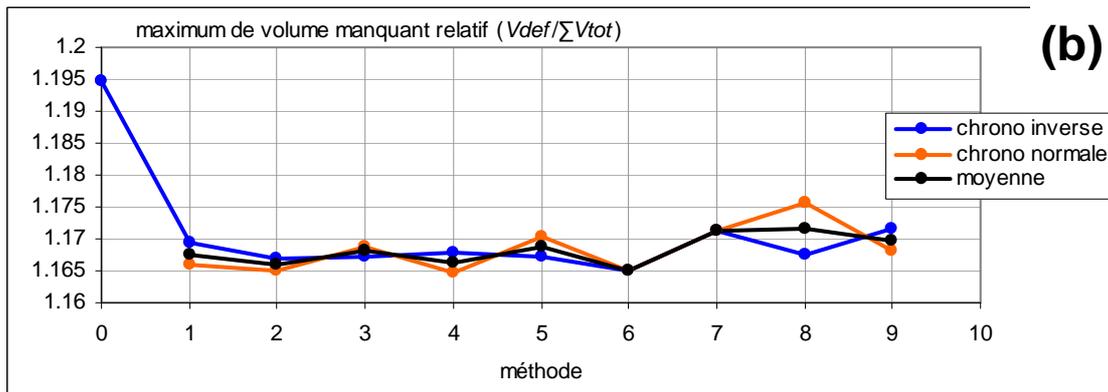
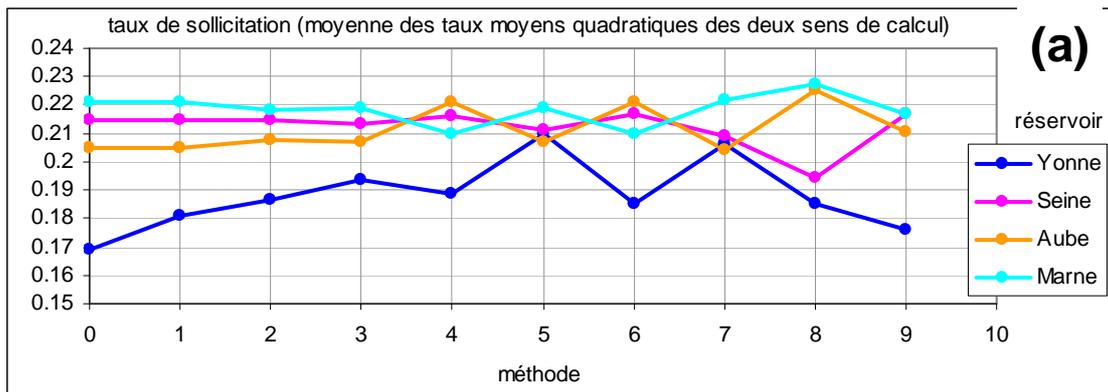


Figure 7.2.B : valeurs des taux de sollicitation des réservoirs, du volume manquant relatif et de la défaillance totale de débit obtenues avec les différentes méthodes pour l'objectif de laminage de crue de la Seine à paris à  $800 m^3/s$

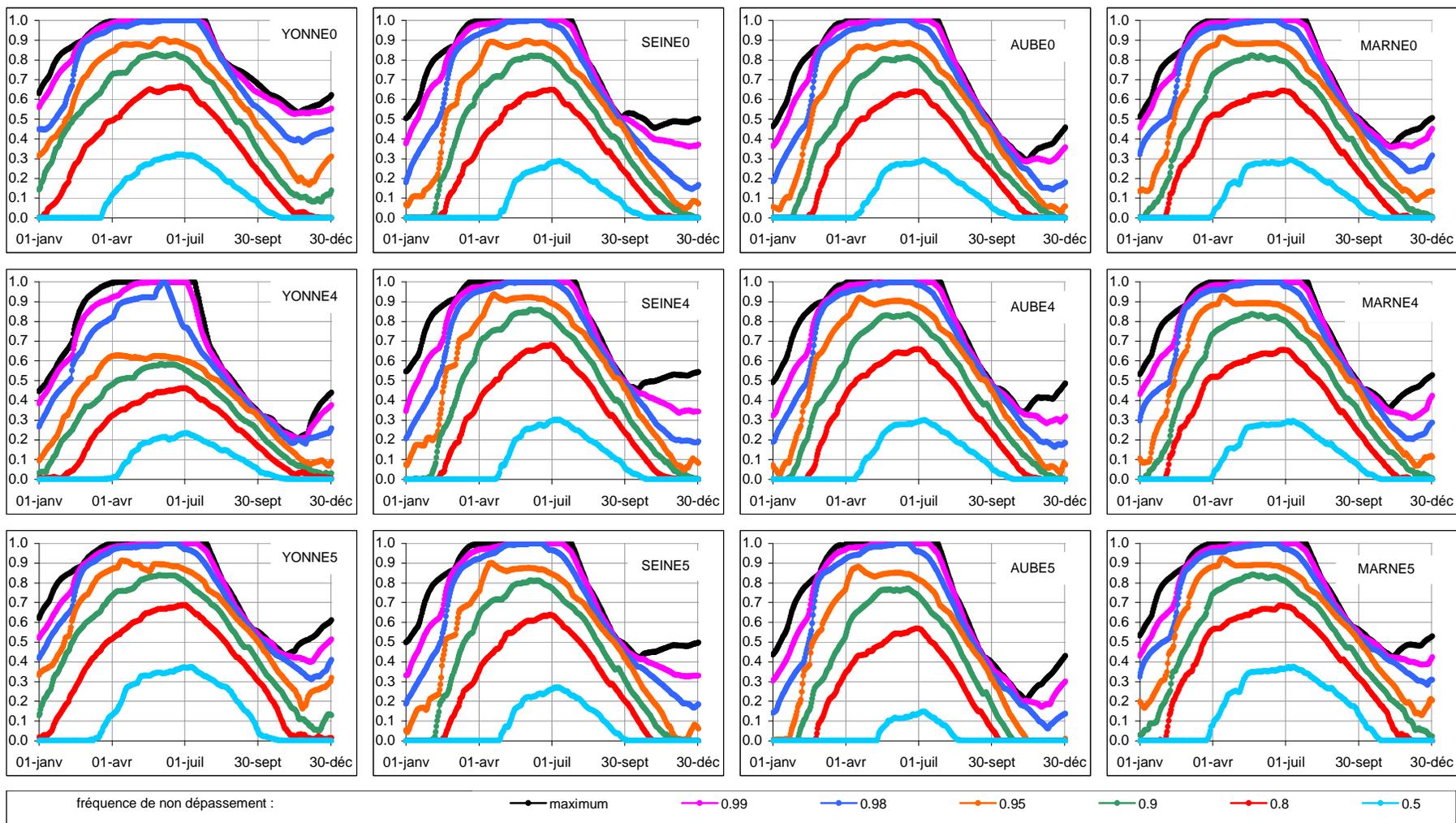


Figure 7.2.C: chronogrammes annuels iso-fréquence du taux minimal de remplissage  $V_{obj}/V_{tot}$  nécessaire pour la meilleure satisfaction ultérieure possible du soutien d'étiage à  $125 \text{ m}^3/\text{s}$  dans la Seine à Paris, calculés par les méthodes 0, 4 et 5 sur la période 1900-2009

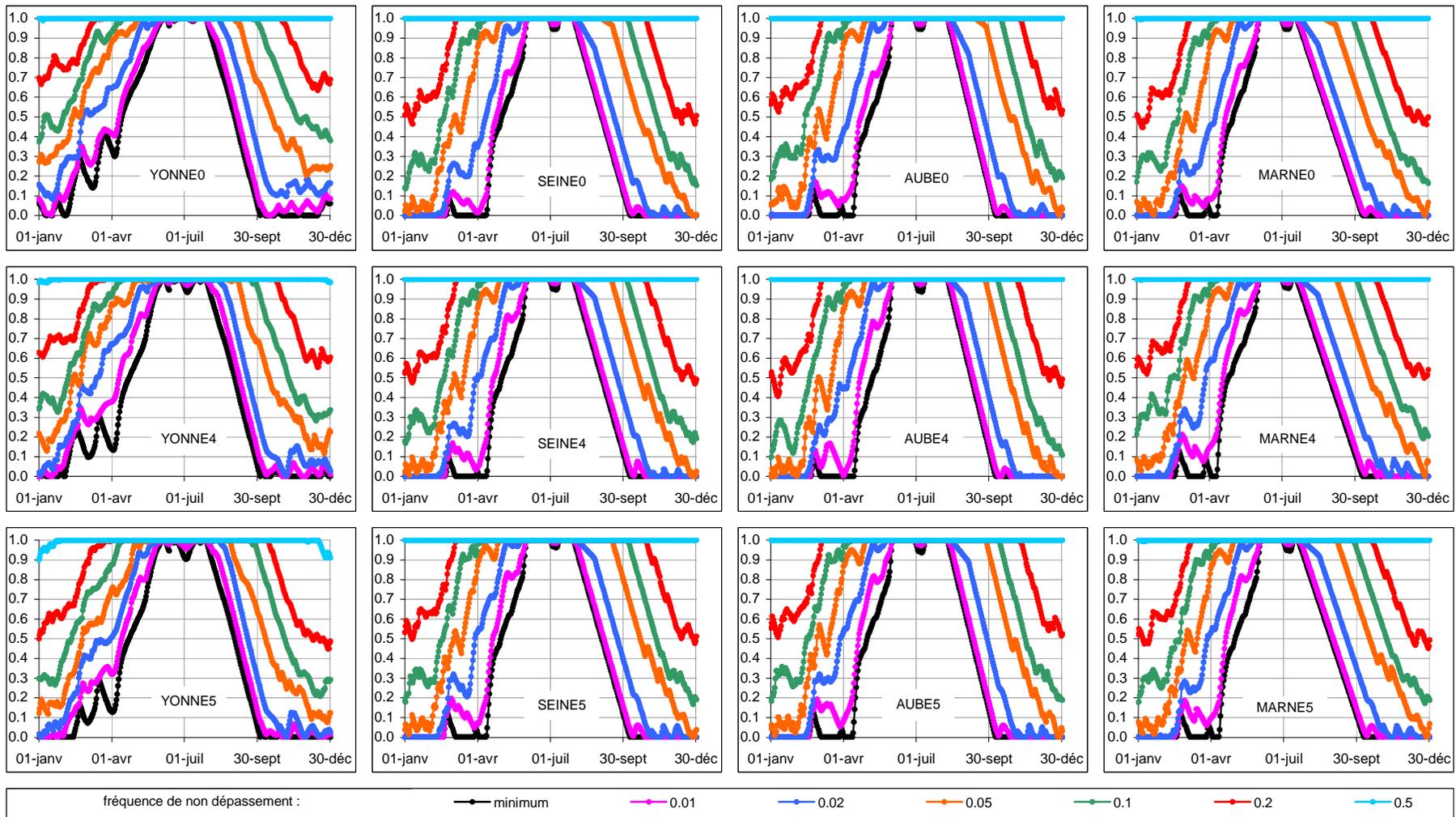


Figure 7.2.D: chronogrammes annuels iso-fréquence du taux maximal de remplissage  $V_{obj}/V_{tot}$  compatible avec la meilleure satisfaction ultérieure possible du laminage de crue à  $800 \text{ m}^3/\text{s}$  dans la Seine à Paris, calculés par les méthodes 0, 4 et 5 sur la période 1900-2009

## ANNEXE : DONNÉES COMPLÉMENTAIRES UTILISÉES

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

Yonne à Chaumard	:	PANNE_PR
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 09/01/1900 au 26/12/2009

### Consignes de gestion actuelles

-Débit réservé dans le cours d'eau juste à l'aval de la prise ( $QM_{res}$ )

- Yonne :  $QM_{res1}=0$
- Seine : en octobre, novembre et de janvier à mars,  $QM_{res2} = 3 \text{ m}^3/\text{s}$  ; en décembre et d'avril à septembre,  $QM_{res2} = 3 \text{ m}^3/\text{s}$  si  $QM_{nat2}>10$ ,  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  si  $10>QM_{nat2}>8$ ,  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  si  $8>QM_{nat2}>6$  et  $QM_{nat2}$  si  $QM_{nat2}<6$
- Aube : de novembre à mars,  $QM_{res3} = 2 \text{ m}^3/\text{s}$  ; d'avril à octobre :  $QM_{res3} = 2 \text{ m}^3/\text{s}$  si  $QM_{nat3}>8$ ,  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  si  $8>QM_{nat3}>6$ ,  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  si  $6>QM_{nat3}>4$  et  $QM_{nat3}$  si  $QM_{nat3}<4$
- Marne : d'avril à octobre,  $QM_{res4} = 11 \text{ m}^3/\text{s}$  ; de novembre à mars,  $QM_{res4} = 7 \text{ m}^3/\text{s}$

-débit de référence dans le cours d'eau juste à l'aval de la prise ( $QM_{ref}$ ) :

- Yonne :  $QM_{ref1} = 0$

- 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 :  $QVres1(t) = \max(0.6 ; QVnat1(T-1)-2)$ , 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 :  $QVref1(t) = \min(QVref1o, QVnat1(T-1)+2)$ , 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 :  $QEmin1 = 1E20$
- Seine, Aube, Marne :  $QEmin2 = QEmin3 = QEmin4 = 0$

-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 de la restitution ( $QS_{min}$ ) :

- Yonne, Aube, Marne :  $QS_{min1} = QS_{min3} = QS_{min4} = 0$
- Seine :  $QS_{min2} = 0.8 \text{ m}^3/\text{s}$  (débit minimal destiné au canal de Baires. Cet objectif de gestion est assimilé ici à une contrainte de gestion)

-débitance maximale de la restitution ( $QS_{max}$ )

- Yonne :  $QS_{max1} = 16 \text{ m}^3/\text{s}$  (limite réglementaire correspondant au débit maximal turbinable)
- Seine :  $QS_{max2} = 35 \text{ m}^3/\text{s}$
- Aube :  $QS_{max3} = 35 \text{ m}^3/\text{s}$
- Marne :  $QS_{max4} = 50 \text{ m}^3/\text{s}$

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

- Yonne :  $V_{tot1} = 74$
- Seine :  $V_{tot2} = 212.9$
- Aube :  $V_{tot3} = 181.2$
- Marne :  $V_{tot4} = 354.5$

-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 :  $D1 = 71 \text{ H}$

- Seine :  $D2 = 126$  H
- Aube :  $D3 = 137$  H
- Marne :  $D4 = 107$  H