

Record Number: 19130
Author, Monographic: Haché, M.//Fortin, V.//Ouarda, T. B. M. J.//Fagherazzi, L.//Bobée, B.
Author Role:
Title, Monographic: Utilisation des modèles de génération synthétique en mode prévisionnel
Translated Title:
Reprint Status:
Edition:
Author, Subsidiary:
Author Role:
Place of Publication: Québec
Publisher Name: INRS-Eau
Date of Publication: 2000
Original Publication Date: Décembre 2000
Volume Identification:
Extent of Work: 44
Packaging Method: pages incluant un annexe
Series Editor:
Series Editor Role:
Series Title: INRS-Eau, rapport de recherche
Series Volume ID: 570
Location/URL:
ISBN: 2-89146-343-9
Notes: Rapport annuel 2000-2001
Abstract:
Call Number: R000570
Keywords: rapport/ ok/ dl

**UTILISATION DES MODÈLES DE
GÉNÉRATION SYNTHÉTIQUE EN
MODE PRÉVISIONNEL**

Rapport de recherche R-570

UTILISATION DES MODÈLES DE GÉNÉRATION SYNTHÉTIQUE EN MODE PRÉVISIONNEL

par

**Mario Haché
Vincent Fortin
Taha Ouarda
Laura Fagherazzi
Bernard Bobée**

**Chaire en Hydrologie statistique Hydro-Québec / CRSNG
Institut national de la Recherche scientifique, INRS-Eau
2800, rue Einstein, CP 7500, Sainte-Foy, Québec, G1V 4C7**

Rapport de recherche No R-570

Décembre 2000

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	1
2. GÉNÉRATION DES SÉRIES-MÈRES	3
2.1 Procédure de génération des séries-mères	3
2.2 Programme <i>Matlab</i> de génération de séries-mères	3
2.2.1 Lecture des données.....	5
2.2.2 Rattachement météorologique	6
2.2.3 Génération des séries d'apports prévisionnels.....	7
2.2.4 Ajout du bruit	7
2.2.5 Transition vers les séries d'apports harmonisés.....	9
2.3 Lien avec le programme de génération des séries-mères synthétiques.....	10
3. GÉNÉRATION DES SÉRIES-MÈRES SYNTHÉTIQUES	11
3.1 Fichier projet.....	11
3.2 Module de transformation	12
3.3 Module de simulation	12
4. ANALYSE DU RISQUE	15
5. RÉFÉRENCES	17
ANNEXE A.....	A1-A20

1 INTRODUCTION

Ce rapport décrit les travaux réalisés dans le cadre du projet "Utilisation des modèles de génération synthétique en mode prévisionnel". Dans ce projet un prototype opérationnel d'un système de génération de séries-mères et de séries-mères synthétiques a été développé pour la région de la Gatineau (Dozois, Cabonga, Baskatong et Paugan). La section 2 de ce rapport décrit la procédure de génération des séries-mères avec les recommandations suggérées lors du projet C6 de la chaire en hydrologie statistique (Ouarda *et al.*, 1998). La section 3 présente la procédure de génération de séries-mères synthétiques basée sur les travaux du projet C4 de la chaire (Rasmussen *et al.*, 1998). L'analyse du risque basée sur les séries-mères originale et synthétiques est décrite à la section 4. Enfin, l'Annexe A donne deux exemples d'application de la méthodologie avec des sorties graphiques pour le réservoir Baskatong.

2. GÉNÉRATION DES SÉRIES-MÈRES

2.1 Procédure de génération des séries-mères

Dans la première étape de la génération des séries-mères, des séries d'apports prévisionnels sont produites à l'aide du modèle météo-apport utilisé avec les conditions hydrologiques actuelles du bassin et les prévisions météorologiques des quatre prochains jours auxquelles on rattache les données météorologiques observées durant l'historique.

Dans la deuxième étape de la génération, un bruit décroissant avec le temps est ajouté aux apports prévisionnels pour tenir compte de l'imprécision du modèle conceptuel et des variables d'entrée.

Les séries ainsi simulées ont toutes comme point de départ l'état actuel du bassin versant et devraient converger à long terme vers les séries historiques des années qu'elles représentent (avec un modèle météo-apport parfait). Toutefois, en pratique, l'adéquation entre les apports calculés et les apports observés historiquement n'est pas toujours bonne. Pour garantir la convergence, la troisième étape de la génération consiste à combiner linéairement les séries d'apports observés et les séries d'apports prévisionnels avec une fonction de transition. Les séries finales sont appelées « séries-mères d'apports ».

2.2 Programme *Matlab* de génération de séries-mères

La fonction *seriesmeres* permet de générer les séries-mères. Les intrants suivants doivent être fournis :

Paramètre d'entrée	Format	Contenu
<i>nomBassin</i>	Chaîne de caractères	Nom du bassin (Ex : 'BASKATONG')
<i>jour1</i>	Chaîne de caractères	Date du jour 1 des prévisions météorologiques (Ex : '1-JAN-1999')
<i>duree</i>	Entier positif	Nombre de jours déterminant la durée des séries-mères
<i>type_rattachement</i>	0 ou 1	Type de rattachement des prévisions météorologiques aux séries climatiques : 0 : rattachement basé sur la date 1 : rattachement basé sur la méthode du voisin le plus proche
<i>ajout_bruit</i>	0, 1 ou 2	Type de bruit ajouté aux séries d'apports prévisionnels : 0 : aucun bruit ajouté 1 : bruit AR(1) ajouté 2 : bruit linéaire ajouté
<i>transition</i>	0 ou 1	Type de transition vers les séries d'apports harmonisés : 0 : aucune transition 1 : transition linéaire
<i>connectString</i>	Cellules de chaîne de caractères	Paramètres de connection à la banque de données (Ex : {'SPAN', 'span1', 'span1', 'SQL'})

La fonction *seriesmeres* donne trois sorties :

Paramètre de sortie	Format	Contenu
<i>sm</i>	matrice $n \times m$ où n est le nombre de jours dans les séries-mères (<i>duree</i>) et m est le nombre d'années dans l'historique météo	Séries-mères
<i>serie_meteo</i>	matrice $n \times m$	Séries météorologiques utilisées pour calculer les séries d'apports prévisionnels
<i>ind_fin_trans</i>	vecteur $1 \times m$	Indice du jour de la fin de la période de transition

Le programme Matlab de génération de séries-mères est divisé en 5 parties:

- Lecture des données
- Rattachement météorologique
- Génération des séries d'apports prévisionnels
- Ajout du bruit
- Transition vers les séries d'apports harmonisés

Dans ce qui suit, nous allons aborder en détail chacune de ces parties.

2.2.1 Lecture des données

La lecture des données nécessaires à la fonction *seriesmeres* est effectuée dans cette partie. Les données récupérées sont :

- les données historiques météorologiques (matrice *meteo*) et d'apports naturels (matrice *apports*) ainsi que les dates correspondantes (vecteur *dateheure*). Ces données se retrouvent dans un fichier Matlab "*nomBassin_historique.mat*".

- les paramètres du modèle météo-apport associés au bassin d'intérêt (vecteurs *param* et *superficie*). La lecture des paramètres se fait avec la fonction Matlab *span_lectureParam*.
- les variables d'états (matrices *etat* et *eau*) associés à la veille du jour 1 des prévisions (c'est-à-dire le jour 0). La lecture des variables d'états se fait à l'aide de la fonction Matlab *span_lectureEtat*.
- le biais toléré (scalaire *ecartDebit*) entre la série d'apports prévisionnels (états de l'année courante et météo de l'année *i*) et la série d'apports simulés (états et météo de l'année *i*). La lecture du biais est effectuée à partir de la fonction Matlab *span_lectureCritereRaccordement*.
- les prévisions météorologiques pour les jours 1 à 4 (matrice *meteo_prev_jour1_4*). Cette lecture se fait avec la fonction Matlab *span_lecturePrevisionsMeteo*. Lorsqu'il y a des prévisions manquantes, les prévisions sont remplacées par la moyenne des données historiques des jours correspondants.
- les données météorologiques observées la veille du jour 1 des prévisions (*meteo_jour0*). Cette lecture est effectuée par la fonction Matlab *span_lectureHistorique*.
- les variables d'états de la simulation avec les observations météorologiques historiques (matrices *etats_sim* et *eaux_sim*). Ces données se retrouvent dans un fichier Matlab "*nomBassin_etats_sim.mat*". Ce fichier est créé préalablement à l'aide de la fonction Matlab *seriesmeres_calcul_etats_sim(nomBassin)*.

2.2.2 Rattachement météorologique

Le rattachement des séries climatiques aux prévisions météorologiques des jours 1 à 4 peut se faire soit par la date ou soit par la recherche du voisin le plus proche. La méthode du voisin le plus proche est décrite dans le chapitre 3 du rapport du projet C6 (Ouarda *et al.*, 1998).

L'attribut choisi est une somme pondérée des températures moyennes $((T_{min}+T_{max})/2)$ observée au jour 0 et prévues aux jours 1 à 4. Les poids de la somme sont les corrélations entre les températures moyennes des jours 0 à 4 et la température moyenne du jour 5. Ces corrélations ont été calculées à l'aide d'un historique de prévisions météorologiques pour le bassin de Baskatong :

- $\rho(T \text{ prévue au jour 4, } T \text{ observée au jour 5}) = 0.49$
- $\rho(T \text{ prévue au jour 3, } T \text{ observée au jour 5}) = 0.26$
- $\rho(T \text{ prévue au jour 2, } T \text{ observée au jour 5}) = 0.20$
- $\rho(T \text{ prévue au jour 1, } T \text{ observée au jour 5}) = 0.16$
- $\rho(T \text{ observé au jour 0, } T \text{ observée au jour 5}) = 0.14$

Le même calcul sera effectué pour les autres bassins de la région de la Gatineau (Dozois, Cabonga, Paugan) pour vérifier si des corrélations similaires sont observées.

2.2.3 Génération des séries d'apports prévisionnels

La fonction Matlab *hsami_simuler* (modèle météo-apport) permet de générer les séries d'apports prévisionnels avec les états de la veille et les séries météorologiques construites à l'étape précédente (section 1.2.2). Une version "vectorisée" de la fonction *hsami_simuler* a été développée pour réduire le temps de calcul.

2.2.4 Ajout du bruit

La procédure de l'ajout du bruit aux séries mères est décrite au chapitre 2 du rapport du projet C6 (Ouarda *et al.* 1998). L'ajout du bruit se fait en 2 étapes :

- calcul des caractéristiques statistiques du bruit (moyenne, variance, autocorrélation) à l'aide de la fonction Matlab *seriesmeres_variance*;
- modèle du bruit à l'aide des fonctions Matlab *seriesmeres_bruit1* (autorégressif d'ordre 1) ou *seriesmeres_bruit2* (linéaire).

La variance du bruit est déterminée à partir des erreurs de prévisions historiques (apports simulés avec mise à jour – apports observés) pour les jours 1 et 4 des prévisions. Les états nécessaires pour la simulation des apports avec mise à jour se retrouvent dans le fichier Matlab "nomBassin_états_maj.mat". Ce fichier est créé préalablement à l'aide de la fonction Matlab *seriesmeres_calcul_états_maj(nomBassin)*. Le calcul de la variance du bruit est une procédure assez longue et elle utilise la version "vectorisée" de *hsami_simuler* pour gagner du temps.

Au cours des divers essais effectués, il a été remarqué que la variance ainsi calculée avait tendance à être surestimée. En effet, le modèle avec mise à jour laissé à lui-même peut engendrer des erreurs de prévisions historiques plus grandes que celles qui seraient observées avec un prévisionniste présent. Pour cette raison, il est permis à l'utilisateur d'entrer ses propres valeurs de variance selon sa confiance aux prévisions d'apports pour les jours 1 et 4. Voici un exemple du tableau qui est affiché par la fonction *seriesmeres*:

Écart-Type de l'erreur prévisionnelle historique

	----- Jour 1 -----	----- Jour4 -----
2 obs 2 clim :	42	75
4 obs :	42	74
4 clim :	45	78
Apport harm :	82	102

Dans ce tableau, on retrouve à la première colonne la composition des 4 jours de données météorologiques utilisées pour calculer l'apport prévu. Par exemple, "2 obs 2 clim" indique que les deux premiers jours sont composés des données météorologiques de l'année d'intérêt et que les deux derniers jours sont composés des données météorologiques des autres années. L'écart-type des apports harmonisés est également indiqué à titre indicatif.

Ensuite, l'utilisateur est invité à entrer ses propres valeurs ou à choisir les valeurs par défaut (2 jours d'observations et 2 jours de données climatiques).

Il reste plusieurs aspects à approfondir au sujet de l'ajout du bruit. Entre autres, les points suivants devraient être examinés:

- la distribution statistique du bruit
- la variance du bruit

L'ajout d'un bruit suivant une distribution normale peut conduire dans certains cas à des apports prévisionnels négatifs. La distribution du bruit devrait être bornée inférieurement pour empêcher ce genre de situation.

D'autres avenues pour le calcul de la variance du bruit sont à explorer:

- La variance du bruit pourrait être calculée à partir des dernières erreurs de prévisions :

$$Var(bruit) = \sum_{i=-n}^0 w_i E p_i^2$$

où n est la mémoire du modèle et w_i sont des poids croissants avec le temps.

Cette variance serait en effet plus représentative des erreurs de prévisions où un prévisionniste peut intervenir que celle actuellement calculée par la fonction *sériesmères* qui est basée sur les erreurs de prévisions historiques du modèle météo-apport avec mise à jour seulement.

- La variance du bruit pourrait être déduite des matrices de covariance du filtre de Kalman.
- L'incertitude du stock de neige pourrait être modélisée par une distribution log-normal (la moyenne et la variance du stock de neige sont généralement bien connues).
- L'incertitude sur le volume d'eau de pluie des 4 jours de prévisions météorologiques pourrait être modélisée par une distribution gamma.
- Le bruit devrait être corrélé spatialement lorsque les séries-mères sont calculées pour plusieurs bassins.

2.2.5 Transition vers les séries d'apports harmonisés

La détermination de la fonction de transition vers les apports harmonisés est décrite à la section 2.6 du rapport du projet C6 (Ouarda *et al.* 1998). Les deux paramètres de la fonction de transition sont les dates de début et de fin de la transition. Premièrement, la date où l'écart cumulé à rebours entre la série prévisionnelle avec les états courants et la météo de l'année i et la série simulée avec les états et la météo de l'année i dépasse une constante de convergence (fixée par Hydro-Québec) est déterminée. Cette date est notée *ind_Smin*. Le début de la transition est défini par :

$$\max(\text{ind_Smin}/3, 14)$$

et la fin de la transition est donnée par :

$$\max(\text{ind_Smin}, 28)$$

Avec la méthode du voisin le plus proche pour rattacher des séries climatiques aux prévisions météorologiques, on peut observer un décalage entre les événements. Dans ce cas, afin de calculer *ind_Smin*, les apports sont simulés à partir des séries météorologiques construites sur la base du voisin le plus proche.

2.3 Lien avec le programme de génération des séries-mères synthétiques

L'utilisation des modèles de génération de séries-mères synthétiques en mode prévisionnel va se faire sur la région de la Gâtineau (Dozois, Baskatong, Cabonga et Paugan). Le programme Matlab *seriesmeres_gatineau* permet de faire le lien entre la génération des séries-mères avec le modèle météo-apport et la génération des séries-mères synthétiques avec les modèles stochastiques. Lors de l'exécution du programme *seriesmeres_gatineau*, les quatre fichiers Matlab suivants sont créés :

- *dozois_sm.mat*
- *baskatong_sm.mat*
- *cabonga_sm.mat*
- *paugan_sm.mat*

Ces fichiers contiennent trois variables nécessaires pour le logiciel de génération stochastique:

- *sm* : les séries-mères
- *ind_fin_trans* : les indices de la fin de la fonction de transition
- *jour1* : la date du jour 1 des prévisions météorologiques

3. GÉNÉRATION DES SÉRIES-MÈRES SYNTHÉTIQUES

La théorie concernant les modèles de génération stochastique des apports naturels (CPARMA, désagrégation spatiale, désagrégation temporelle) est décrite en détail dans le rapport du projet C4 (Rasmussen *et al.*, 1998). Le logiciel *PARADE* développé dans le cadre du projet C4 et intégrant les différents modèles de génération stochastique est présenté au chapitre 7 de ce rapport. Pour générer les séries-mères synthétiques, les paramètres estimés à partir des données historiques sont utilisés. Les transformations de la période de prévision sont toutefois modifiées. Le chapitre 5 du rapport C6 (Ouarda *et al.* 1998) donne plus de détails sur ce sujet.

3.1 Fichier projet

Le fichier projet contient toute l'information pertinente sur les modèles stochastiques pour les bassins d'intérêt. Il est normalement créé par le logiciel *PARADE* lors de la calibration des modèles. Il contient les variables suivantes :

- *site* : information sur les sites et les paramètres de transformation des données
- *parma* : paramètres des modèles stochastiques
- *seriemere* : information sur les séries-mères (le nombre de sites où des séries-mères sont produites peut être inférieur au nombre de sites dans les modèles stochastiques).

Les champs des deux premières variables sont décrits dans le rapport C4. La nouvelle variable *seriemere* contient les champs suivants :

.name : nom du site

.path : emplacement du fichier contenant les séries-mères (fichier nomBassin_ *sm.mat*", voir section 1.3)

.trfparam : paramètres de transformation des séries-mères

.jour1_trf: date du jour 1 des prévisions météorologiques pour laquelle les transformations des séries-mères ont été effectuées

.ind_fin_trans: les indices de la fin de la fonction de transition

Le fichier projet de la région de la Gatineau se nomme *gatineau_sm.mat*. La calibration des modèles stochastiques a été effectuée préalablement dans le projet "Outaouais" (Rasmussen *et al.*, 1995).

3.2 Module de transformation

Pour l'instant, les paramètres qui définissent la structure temporelle et spatiale des données ne sont pas modifiés. Par contre, les transformations de la période entre le jour 1 des prévisions météorologiques et la fin de la fonction de transition doivent être modifiées.

Dans un premier temps, les valeurs journalières des séries-mères sont agrégées en valeurs hebdomadaires. Dans un deuxième temps, les deux semaines où le jour 1 des prévisions météorologiques et la fin de la transition se trouvent sont identifiées.

Le module de transformation peut être appelé de deux manières :

- en lançant le logiciel *PARADE_SM* et en cliquant sur le bouton *Transformation*;
- en exécutant directement la fonction *act_transfo('INTERFACE')*.

L'interface du module de transformation de *PARADE_SM* est pratiquement identique à celui de *PARADE*. Les seules modifications à l'interface sont l'ajout de la date du jour 1 des prévisions et la période couvrant les semaines à transformer (semaine du jour 1 des prévisions à la semaine de la fin de la transition).

3.3 Module de simulation

Une fois les transformations effectuées par l'utilisateur, la génération des séries-mères synthétiques peut débuter.

La fonction de simulation peut être appelée de deux manières:

- En lançant le logiciel *PARADE_SM* et en cliquant sur le bouton *Simulation*;
- En exécutant directement la fonction *flowsimulation2*.

La fonction *flowsimulation2* permet de générer les séries-mères synthétiques. Les intrants suivants doivent être fournis :

Paramètre d'entrée	Format	Contenu
<i>fichier_modele</i>	Chaîne de caractères	Le nom et l'emplacement du fichier projet (Ex : 'c\Gatinea\Gatineau_sm.mat')
<i>nyears</i>	Entier positif	Nombre de séries-mères synthétiques
<i>flag_save</i>	0 ou 1	Type de sauvegarde des séries-mères : 0 : aucune sauvegarde 1 : sauvegarde dans les fichiers "nomBassin.sm" sous le répertoire <i>yflowsim</i> avec un format ASCII

La fonction *flowsimulation2* donne trois sorties :

Paramètre de sortie	Format	Contenu
<i>Qdsim_liss</i>	matrice $n \times m \times p$ où n est le nombre de séries-mères (<i>nyears</i>); m est le nombre de jours dans les séries-mères (<i>duree</i>) et p est le nombre de sites où il y a des séries-mères	Séries-mères synthétiques journaliers
<i>Qsm</i>	matrice $n \times l \times p$ où l est le nombre de semaines dans les séries-mères ($duree/7$)	Séries-mères synthétiques hebdomadaires

Les fichiers de séries-mères synthétiques peuvent ensuite être utilisés pour diverses applications, dont l'analyse du risque.

Le module de simulation des séries-mères de *PARADE_SM* a été considérablement modifié par rapport au module de simulation des apports naturels de *PARADE*. Dans l'ancienne version, les apports étaient simulés une semaine à la fois afin de conserver le lien entre les semaines (en particulier, entre la dernière semaine d'une année et la première semaine de l'année suivante). Dans le cas des séries-mères, il n'existe pas de lien entre la fin d'une série-

mère et le début de la série-mère suivante. Il est donc possible de générer les séries-mères n semaines à la fois, où n est le nombre de scénarios synthétiques désirés. La version "vectorisée" du module de simulation est beaucoup plus rapide que l'ancienne version.

La fonction de simulation est divisée en 6 parties :

- identification des indices de différentes périodes (warm-up, séries-mères)
- simulation à partir du modèle CPARMA
- désagrégation spatiale
- désagrégation temporelle
- lissage
- sauvegarde des séries-mères synthétiques dans des fichiers

Lors de la désagrégation temporelle, il peut y avoir des ruptures d'une semaine à l'autre. Afin d'amoindrir cet effet de rupture, les séries synthétiques sont soumises à un lissage. Ce lissage consiste simplement à trouver le point milieu entre la fin d'une semaine et le début de la semaine suivante et à modifier linéairement les valeurs à partir de la mi-semaine pour que les deux semaines se rencontrent à ce point milieu.

4. ANALYSE DU RISQUE

Une fois les séries-mères originales et synthétiques générées, il est possible d'effectuer une analyse du risque à partir de ces séries. Trois règles de gestion des réservoirs correspondant à des scénarios moyens à 15%, 50% et 85% sont établies (voir Annexe A). Pour chacune des règles de gestion, une analyse du risque est effectuée sur les n séries synthétiques. À partir de cette analyse, les probabilités de dépassement d'un seuil critique sont calculées pour chaque jour. La probabilité de ne pas remplir le réservoir peut être également déterminée. Il est entendu qu'à l'avenir il sera préférable d'établir des règles de gestion adaptées à chaque scénarios car en pratique ces règles ne sont pas indépendantes des apports qui sont observées.

La fonction Matlab *anrisk* a été développée pour effectuer l'analyse du risque pour la région de la Gatineau. Les intrants suivants doivent être fournis :

Paramètre d'entrée	Format	Contenu
sm	matrice $n \times m \times p$ où n est le nombre de séries-mères synthétiques ($nyears$) m est le nombre jours dans les séries-mères ($duree$) et p est le nombre de bassins	Séries-mères des bassins Dozois ($p=1$), Cabonga ($p=2$), Baskatong ($p=3$) et Paugan ($p=4$)
qs	matrice $m \times p$	Règles de gestion (débit soutiré) pour les sites Dozois ($p=1$), Cabonga ($p=2$), Baskatong ($p=3$) et Barrière ($p=4$)
$v0$	vecteur $1 \times p$	Volume initiale aux réservoirs Dozois ($p=1$), Cabonga ($p=2$), Baskatong ($p=3$)

La fonction *anrisk* donne trois sorties :

Paramètre de sortie	Format	Contenu
p	matrice $m \times p$	Probabilité moyenne de dépassement à Cabonga ($p=1$), Baskatong ($p=2$) et Maniwaki ($p=3$)
vm	matrice $m \times p$	Volume moyen des réservoirs Dozois ($p=1$), Cabonga ($p=2$), Baskatong ($p=3$)
qm	vecteur $m \times 1$	Débit moyen à Maniwaki

5. RÉFÉRENCES

Rasmussen, P.F., Haché, M. et B. Bobée (1998). Rapport final du Projet C4 – Modélisation stochastique des apports naturels. INRS-Eau, rapport de recherche "confidentiel" No R-533, 136 pages.

Ouarda, T., Haché, M., Rasmussen, P.F. et B. Bobée (1998). Rapport final du Projet C6 - Risque et fiabilité en hydrologie. INRS-Eau, rapport de recherche "confidentiel" No R-535, 153 pages.

Rasmussen, P.F., Mathier, L., Salas, J., Fagherazzi, L., Rassam, J.C. (1995). Calibration of a multivariate PARMA model for the Ottawa river system. Rapport de recherche R-432, INRS-Eau, Québec, 77 pages.

ANNEXE A

Exemples d'application

A.1 Introduction

Dans le cadre du projet "Utilisation des modèles de génération synthétique en mode prévisionnel", un prototype opérationnel d'un système de génération de séries-mères et de séries synthétiques prévisionnelles a été développé. Ce système récupère les prévisions météorologiques émises par *TransÉnergie* et les variables d'état de chaque bassin versant stockées dans la base de données *Oracle* du système de prévision d'apports développé par *Hydrosoft Énergie* partir de ces informations et de l'historique hydrométéorologique, le système génère une série-mère pour chaque année d'historique à l'aide de la version *MATLAB* du modèle HSAMI. Les séries-mères générées pour chaque bassin sont sauvegardées sur disque. Par la suite, le logiciel PARADE est invoqué pour effectuer la génération des séries synthétiques. Parce qu'il n'est ni réaliste ni souhaitable de caler en temps réel un modèle stochastique hebdomadaire pour la génération des séries synthétiques, on n'adapte pas les paramètres du modèle stochastique sur les données transformées. Pour adapter la génération aux caractéristiques statistiques des séries prévisionnelles, on ne modifie que les transformations utilisées pour normaliser les apports hebdomadaires. Une fois le choix des transformations effectué et la génération complétée, on désagrège les données hebdomadaires par la méthode du voisin le plus proche. Les séries-mères et les séries synthétiques obtenues peuvent alors être utilisées comme intrants à d'autres modèles ou être visualisées par un usager. Nous présentons ici les résultats obtenus pour deux exemples:

1. Prévision des apports pour 100 jours pour Baskatong à partir du 9 décembre 1999;
2. Prévision des apports pour 100 jours pour Baskatong à partir du 1 mars 1999;

Pour ces deux exemples, la chaîne de génération des séries synthétiques s'est bien comportée pour les bassins Baskatong, Cabonga, Dozois et Paugan. Cependant, il faudra probablement revoir la façon de présenter les séries synthétiques et les séries-mères à l'utilisateur. Les graphiques qu'il avait été convenu de tracer lors de la dernière réunion de travail (scénarios classés par volume et quantiles des distributions marginales quotidiennes) ne semblent pas suffisant pour présenter une image claire de l'incertitude sur la prévision des apports.

Une application visée à court terme consiste à combiner les séries synthétiques à un modèle de laminage pour évaluer les risques de dépassement de contraintes d'exploitation de réservoirs et d'inondation. Nous avons traduit sous *MATLAB* un programme de laminage pour la rivière Gatineau, qui permet de calculer les niveaux des réservoirs Baskatong, Cabonga et Dozois, ainsi que le débit à Maniwaki en fonction des apports et des règles de gestion des ouvrages. Pour une règle de gestion particulière, et pour les séries synthétiques obtenues pour le 1 mars 1999, nous

présentons les résultats d'une analyse du risque de débordement des réservoirs Baskatong et Cabonga, ainsi qu'une analyse du risque d'inondation à Maniwaki.

A.2 Options de simulation retenues

Dans le but d'étudier l'influence des différentes composantes du processus de génération des séries-mères, nous avons convenu qu'il serait possible d'activer ou de désactiver:

- l'ajout de bruit
- le raccordement par la méthode du voisin le plus proche (VPP)
- la transition vers les séries d'apports harmonisés.

En ce qui concerne le bruit, nous laissons le soin à l'utilisateur de fixer sa variance. Cependant, une valeur est suggérée par le système. Cette valeur est obtenue en effectuant une simulation de prévision d'apports sur l'ensemble de l'historique hydrométéorologique et en étudiant la variance de cette prévision en fonction du jour de l'année et de la température moyenne. Cependant, parce que nous ne disposons pas de prévisions météorologiques pour l'ensemble de l'historique, celles-ci sont simulées en remplaçant les deux premiers jours de prévision par les observations (prévision supposée sans erreur), et en remplaçant les deux derniers jours de prévision par la climatologie des différentes années (prévision supposée aussi variable que la climatologie). De plus, parce que nous effectuons une simulation de prévision d'apports de façon automatique, sans reproduire l'intervention du prévisionniste, nous risquons de surestimer l'erreur de prévision. Pour les exemples présentés dans ce rapport, nous avons retenu dans tous les cas la variance suggérée par le système.

En ce qui concerne la génération des séries synthétiques, nous avons dû valider les transformations sélectionnées automatiquement pour éviter des aberrations lors de la génération. De plus, nous avons limité à 1000 le nombre de séries générées. Cependant, le temps de calcul est assez faible pour envisager effectuer 10 000 simulations pour les 4 bassins retenus.

A.3 Options d'affichage retenues

Nous avons effectué différents essais, avec et sans bruit, en utilisant ou non le raccordement par VPP, et avec ou sans transition vers les apports harmonisés. Les résultats de chaque essais ont été tracés avec la fonction `seriesmeres_graphique`. Cette fonction peut afficher:

- les séries simulées (séries-mères et séries synthétiques)
- pour chaque jour de prévision, l'apport simulé moyen

- la moyenne quotidienne de scénarios dont la probabilité de non dépassement du volume, calculé sur la période d'affichage du graphique, appartient à une plage spécifiée par l'utilisateur (scénarios classés par volume)
- pour chaque jour de prévision, les apports simulés dont la probabilité marginale de non dépassement appartient à une plage spécifiée par l'utilisateur (courbes enveloppes).

Pour afficher ces graphiques, il faut donc spécifier un ensemble d'intervalles de probabilités de non dépassement. Dans le but d'afficher un scénario fort, un scénario moyen et un scénario faible, nous avons choisi les plages [10%-20%], [45%-55%] et [80%-90%]. Dans la suite de ce rapport, nous nommerons ces courbes scénario à 15%, scénario à 50% et scénario à 85%. Chacun de ces scénarios est construit à partir de 10% des séries simulées. Dans le cas des séries-mères, cela fait seulement 4 ou 5 séries. Dans le cas des séries synthétiques, ce nombre monte à 100 séries. On peut donc s'attendre à ce que les scénarios moyens tirés des séries synthétiques soient beaucoup plus stables.

A.4 Simulation de 100 jours débutant le 9 décembre 1999

Une simulation de 100 jours débutant le 9 décembre 1999 a été réalisée. Les résultats obtenus pour le bassin de Baskatong sont présentés dans cette section.

Dans le but de comparer les séries-mères générées par le SSEP avec celles générées sur MATLAB, nous avons effectué un premier essai pour lequel:

- nous n'ajoutons pas de bruit
- le rattachement à l'historique météorologique se fait en fonction de la date
- il n'y a pas de transition vers les apports harmonisés

On s'approche ainsi de la méthode utilisée sur SSEP pour la génération des séries-mères.

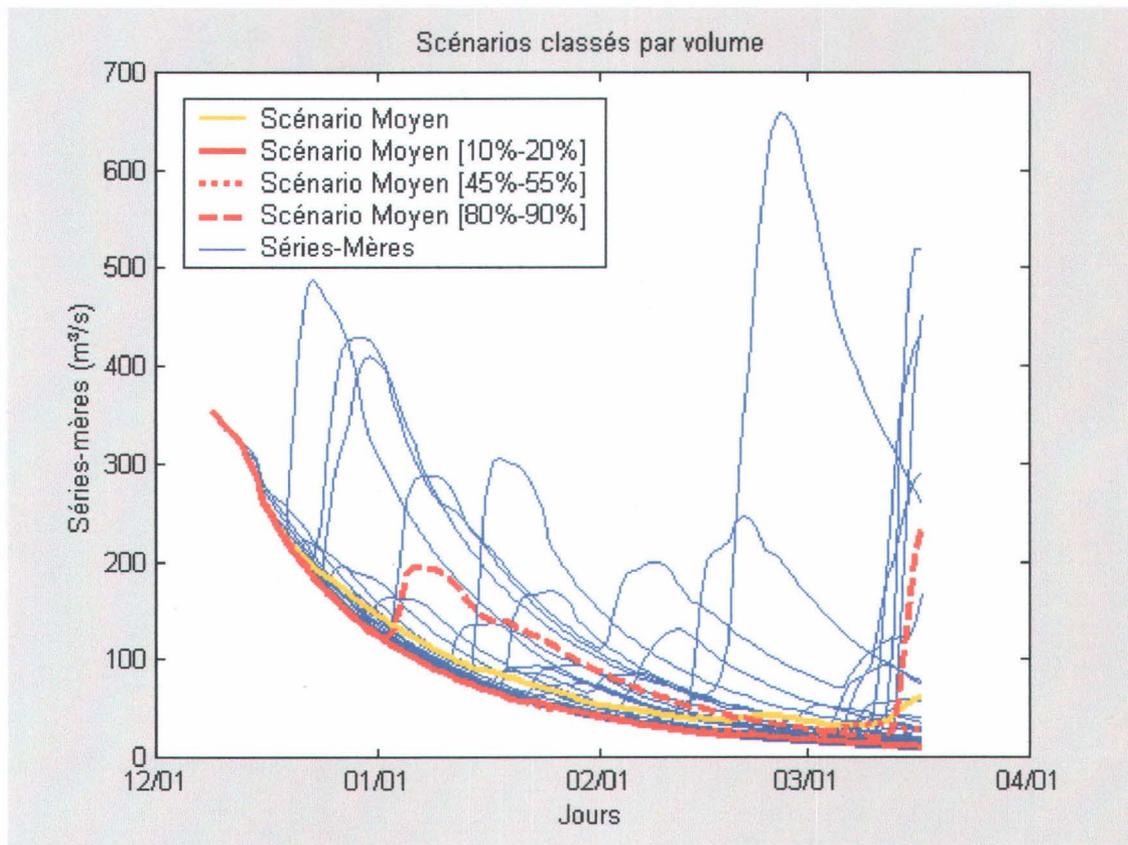


Figure A.1 Séries-mères 9-12-1999

On remarque sur ce premier graphique que le scénario à 15% et le scénario à 50% sont confondus. Ceci s'explique par le fait que la simulation commence au début de l'hiver. Pendant cette saison, le débit simulé est à peu près indépendant de la météo, dans la mesure où il fait froid. Puisqu'il y a des réchauffements dans moins de la moitié des cas, il est normal que ces deux scénarios soient confondus car on néglige ici l'erreur de modèle en n'ajoutant pas de bruit et en n'effectuant pas de transition vers les apports harmonisés. Le scénario à 85% est relativement lisse, mais on observe une remontée de ce scénario au début janvier. On peut voir qu'en effet un nombre non négligeable de crues d'hiver simulées par le modèle. Ceci est dû au fait que les réserves du modèle sont élevées cet automne, car celui-ci a été relativement humide. Ainsi, en fonction de la météo, il arrive assez fréquemment que l'on simule un débordement hivernal des réserves du modèle. Lorsque la zone saturée (la nappe) déborde, le modèle fait ruisseler le surplus via l'hydrogramme de surface, ce qui cause une crue. La série-mère qui atteint plus de 600 m³/s correspond quand à elle à un événement de fonte réel survenu en 1981: le débit observé a atteint une pointe de 800 m³/s le 26 février 1981.

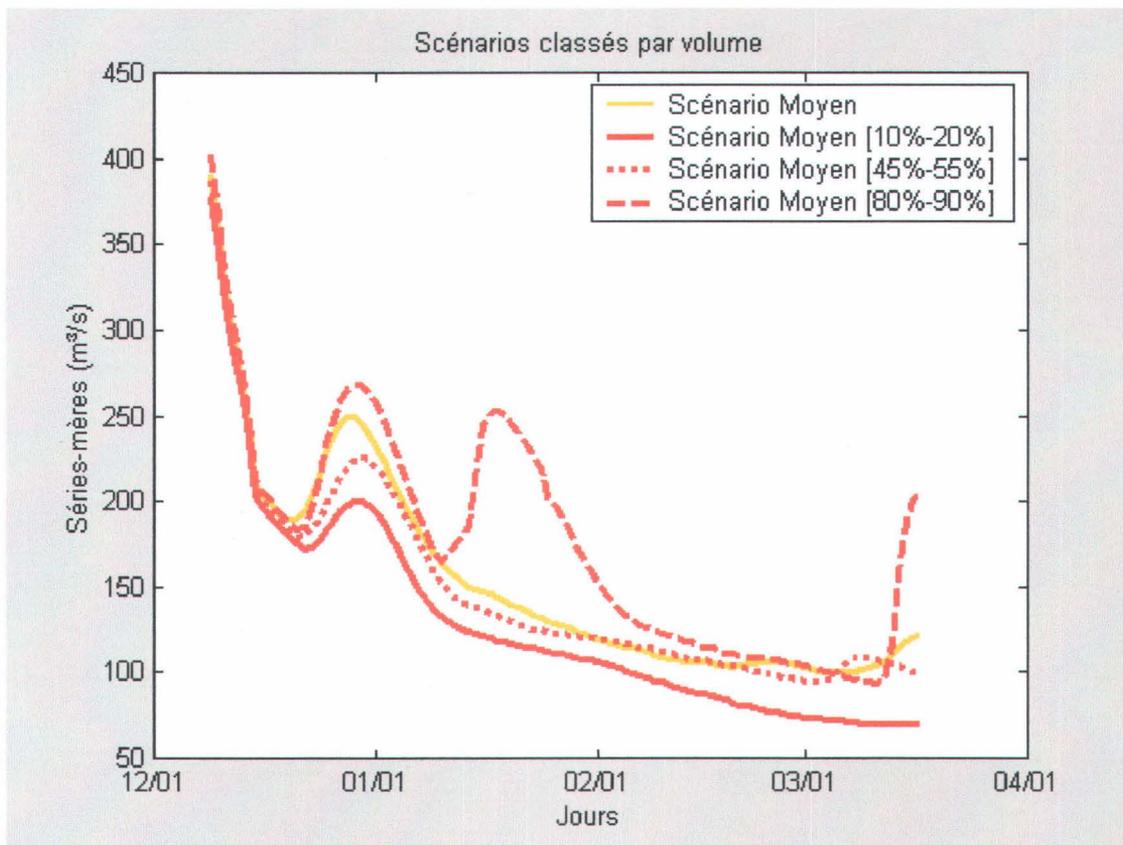


Figure A.2 Scénarios moyens, séries-mères du 9-12-1999 générées par le SSEP

La figure A.2 a été obtenue à partir des séries-mères générées par le SSEP pour la même date. Ces séries ont été obtenues à l'aide d'une version différente du modèle météo-apport, un bruit uniforme a été ajouté, et la transition vers les apports harmonisés est effectuée sur une période de quelques jours. Nous n'avons pas déterminé à quelle date s'effectuait la transition dans ce cas précis. Les séries-mères étant relativement lisses (elles ne sont pas montrées ici), on en déduit que la transition se produit très tard, peut-être passé la période de 100 jours affichée ici. On observe un comportement similaire des scénarios à 85% pour les figures A.1 et A.2. La raison est la même: le débordement des réserves cause un ruissellement de surface. Cependant, pour les séries-mères issues du SSEP, même le scénario à 15% réagit de cette façon. Si toutes les séries-mères réagissent de la même façon à la même date, quelle que soit la météo, cela montre bien l'influence de l'état initial. Ainsi, une légère modification des conditions initiales peut mener à une prévision fort différente, même pour le scénario moyen et le scénario à 50%.

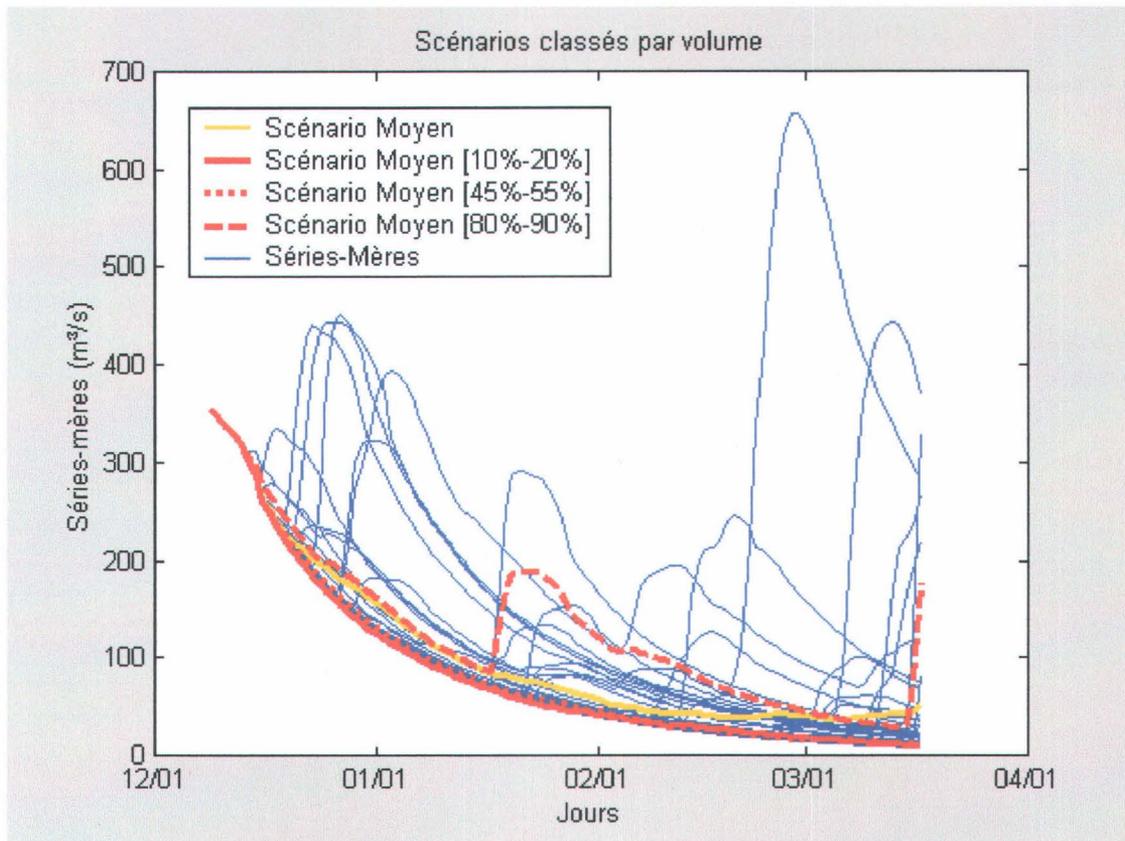


Figure A.3 Séries-mères 9-12-1999, VPP

La seule différence entre la figure A.1 et la figure A.3 est que l'on effectue le raccordement de l'historique météorologique en fonction de la température (méthode du voisin le plus proche). à cette période de l'année, on s'attendrait à ce que la méthode du VPP modifie peu les scénarios moyens. On observe pourtant que le scénario à 85% est assez sensible. En effet, en déplaçant les historiques météorologiques, on change la date à laquelle se produit cette crue hivernale simulée par le modèle. Nous ne croyons pas qu'il faille éliminer du modèle le ruissellement causé par le débordement des réserves. En effet, en condition humide, il importe que le scénario à 85% modèle reproduise le risque de débits hivernaux plus élevés. Cependant, il faudrait peut-être lisser les scénarios moyens à 15%, 50% et 85%. Une autre option, que l'on peut combiner au lissage, serait d'acheminer le débordement des réserves vers l'hydrogramme intermédiaire plutôt que vers l'hydrogramme de surface.

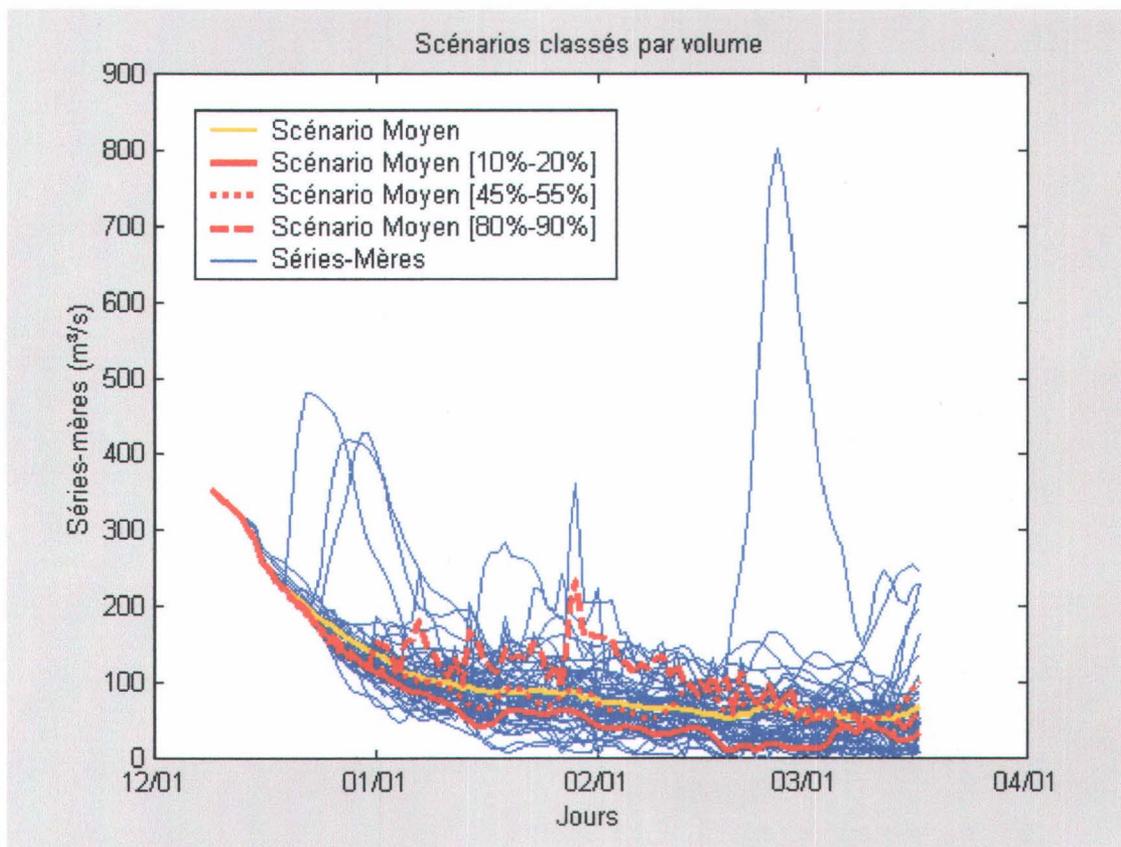


Figure A.4 Séries-mères 9-12-1999, transition

Pour produire la figure A.4, nous avons repris le raccordement en fonction de la date (comme sur la figure A.1), et ajouté la transition vers les apports harmonisés. Comme la transition se fait assez tôt à cette période de l'année et que les débits simulés assez similaires, le bruit ajouté par cette transition est important. On remarque que le scénario à 15% se détache maintenant du scénario à 50%. Cependant, le scénario à 85% est très bruité. Il est en effet influencé par une des années d'apports harmonisés (1950), qui n'a pas été filtrée. Encore une fois, il semble qu'un lissage des scénarios moyens serait utile. On voit aussi que rien n'empêche les scénarios à 15%, 50% et 85% de se croiser. En effet, ces scénarios sont en ordre croissant de volume sur la période totale, non à chaque jour.

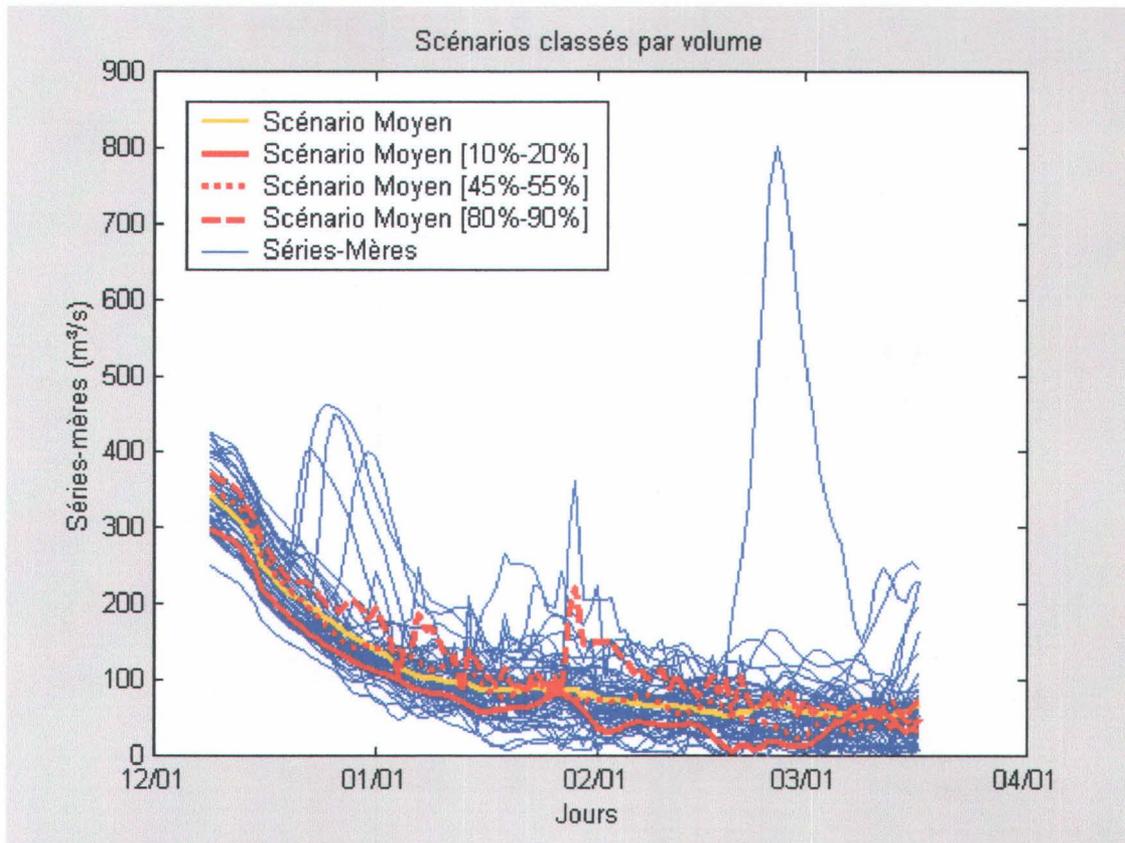


Figure A.5 Séries-mères 9-12-1999, bruit, VPP, transition

La figure A.5 présente les débits simulés avec ajout de bruit pendant les premiers jours, avec raccordement par la méthode du VPP et avec transition vers les apports harmonisés. Les scénarios moyens obtenus reflètent le bruit ajouté pendant la première période, mais ce ne saurait être le cas de façon systématique. Dans la mesure où les écarts entre les scénarios sont significatifs pour cette période, cela signifie uniquement que le volume total des séries calculé sur 100 jours est influencé par les apports des premiers jours. Pour une simulation débutant juste avant la crue, on peut s'attendre à ce que les volumes soient peu influencés par les débits des premiers jours. Dans ce cas, les scénarios à 15%, 50% et 85% devraient être confondus jusqu'au départ de la crue.

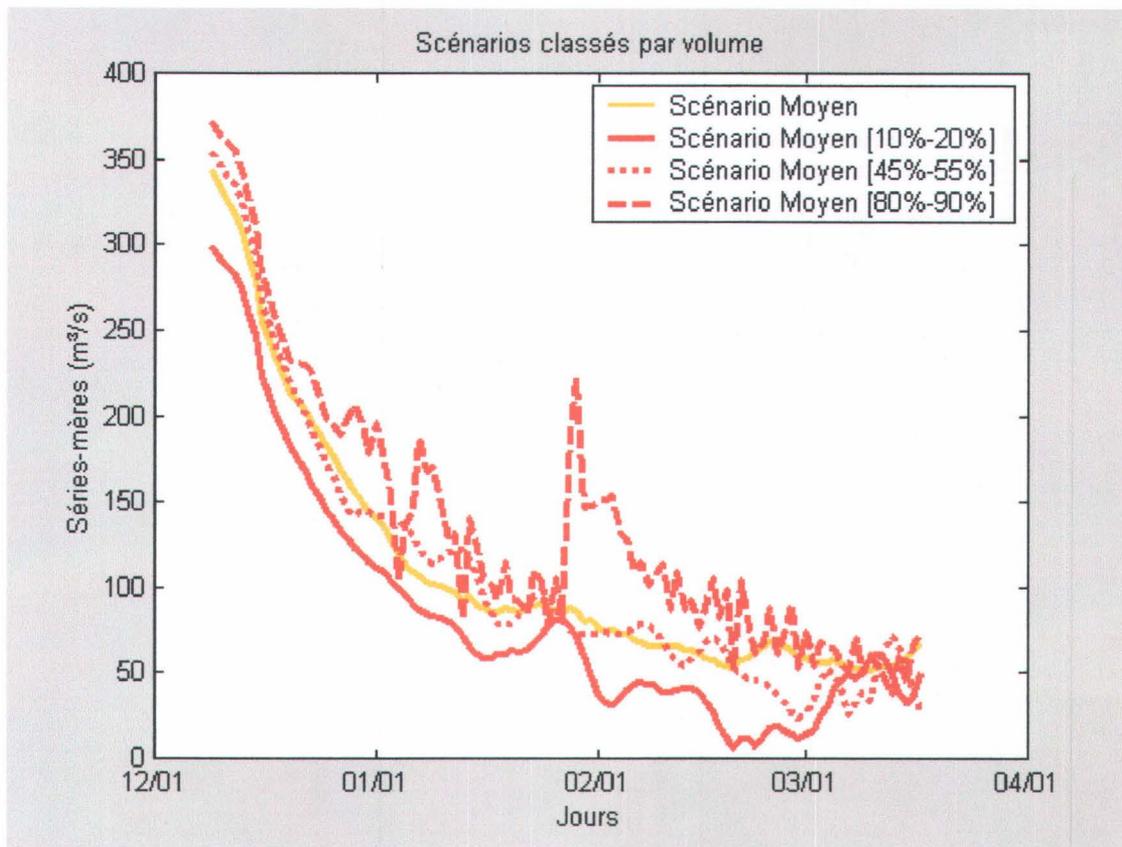


Figure A.6 Scénarios moyens tirées des séries-mères du 9-12-1999, bruit, VPP, transition

La figure A.6 reprend les scénarios présentés à la figure A.5. La seule différence est que l'on n'affiche pas les séries simulées. Il s'agit d'une option de la fonction `seriesmeres_graphique`. Pour les prochaines figures présentant les scénarios classés par volume, nous avons choisi de ne pas afficher les séries-mères et les séries synthétiques, de façon à améliorer la lisibilité des illustrations.

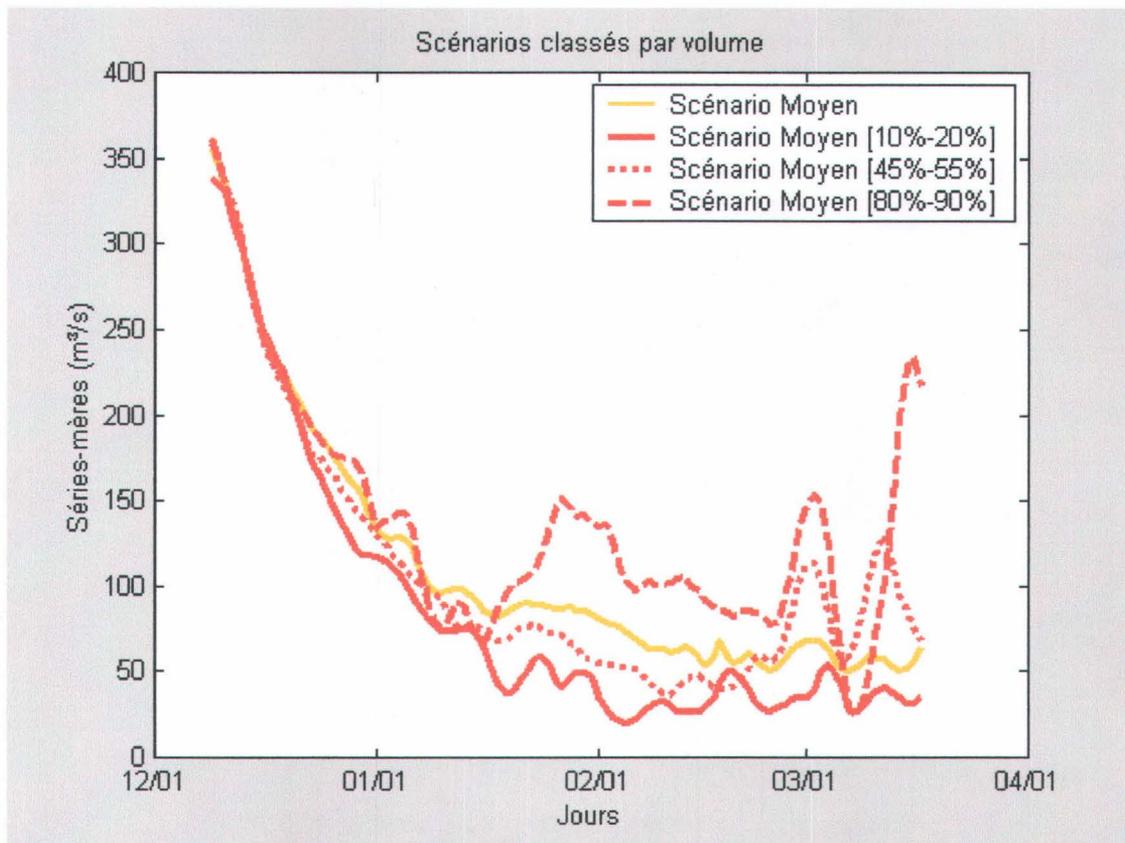


Figure A.7 Scénarios synthétiques moyens du 9-12-1999, bruit, VPP, transition

La figure A.7 a été obtenue à l'aide des séries synthétiques générées à partir des séries-mères utilisées pour obtenir les figures A.4 et A.5, c'est-à-dire en ajoutant du bruit, en effectuant le raccordement par la méthode du VPP et en effectuant une transition vers les apports harmonisés. On remarque que les scénarios moyens obtenus sont effectivement plus lisses, car ils sont basés sur une moyenne de 100 séries synthétiques. Le fait que les trois scénarios soient si près l'un de l'autre signifie que sur un horizon de 100 jours, le volume est à peu près indépendant du débit des premières semaines. Encore une fois, on observe que l'on gagnerait probablement à lisser les scénarios moyens.

A.5 Simulation de 20 jours débutant le 9 décembre 1999

Pour calculer sur une période de 20 jours plutôt que 100 jours les scénarios classés par volume, il n'est pas nécessaire de générer à nouveau les séries-mères ou les séries synthétiques, ni même de tronquer les matrices obtenues lors de la génération. En effet, lors de l'appel de la fonction `seriesmeres_graphique` on peut spécifier sur quelle période sera affichée le graphique. Les volumes sont toujours calculés sur cette période d'affichage.

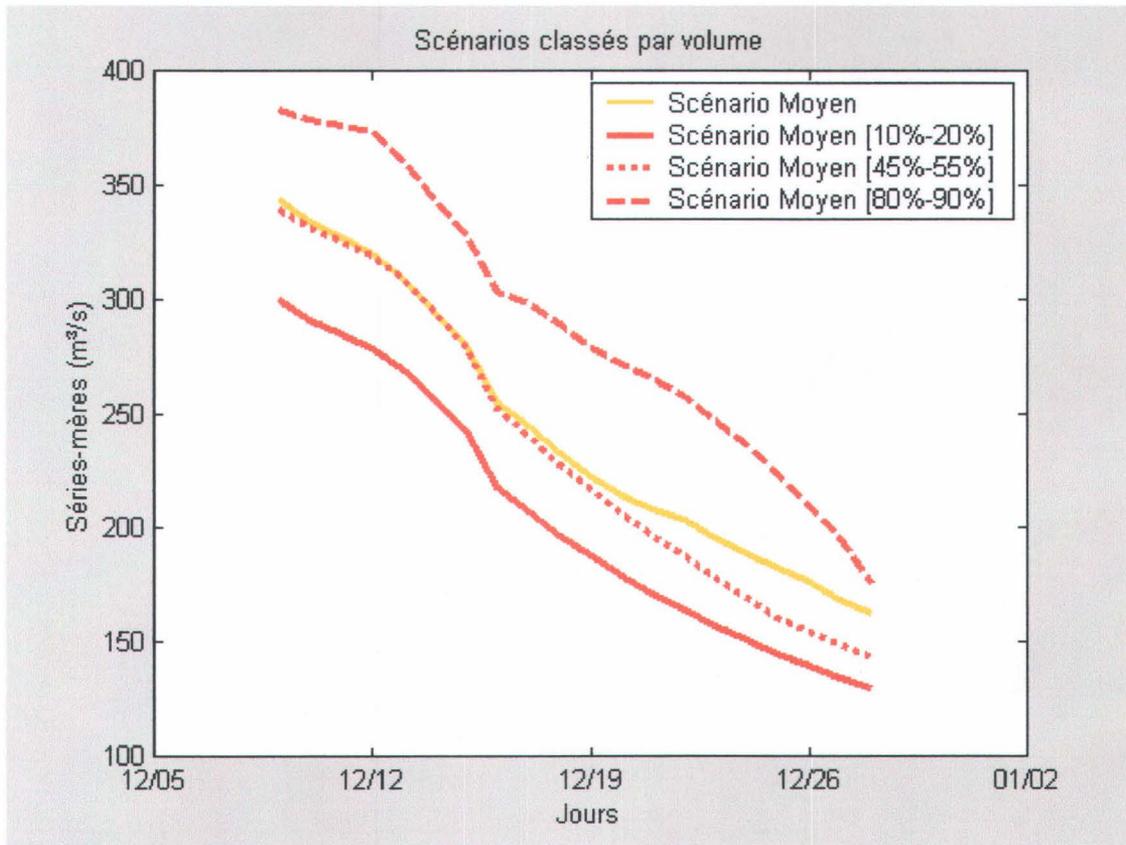


Figure A.8 Scénarios moyens, séries-mères du 9-12-1999, bruit, VPP, transition (20 jours)

À partir des mêmes séries-mères utilisées pour construire la figure A.6, la figure A.8 présente les scénarios moyens calculés sur 20 jours plutôt que 100, de façon à illustrer que sur une plus courte période les scénarios à 15%, 50% et 85% se distinguent davantage, en particulier lorsque l'on se trouve en récession hivernale.

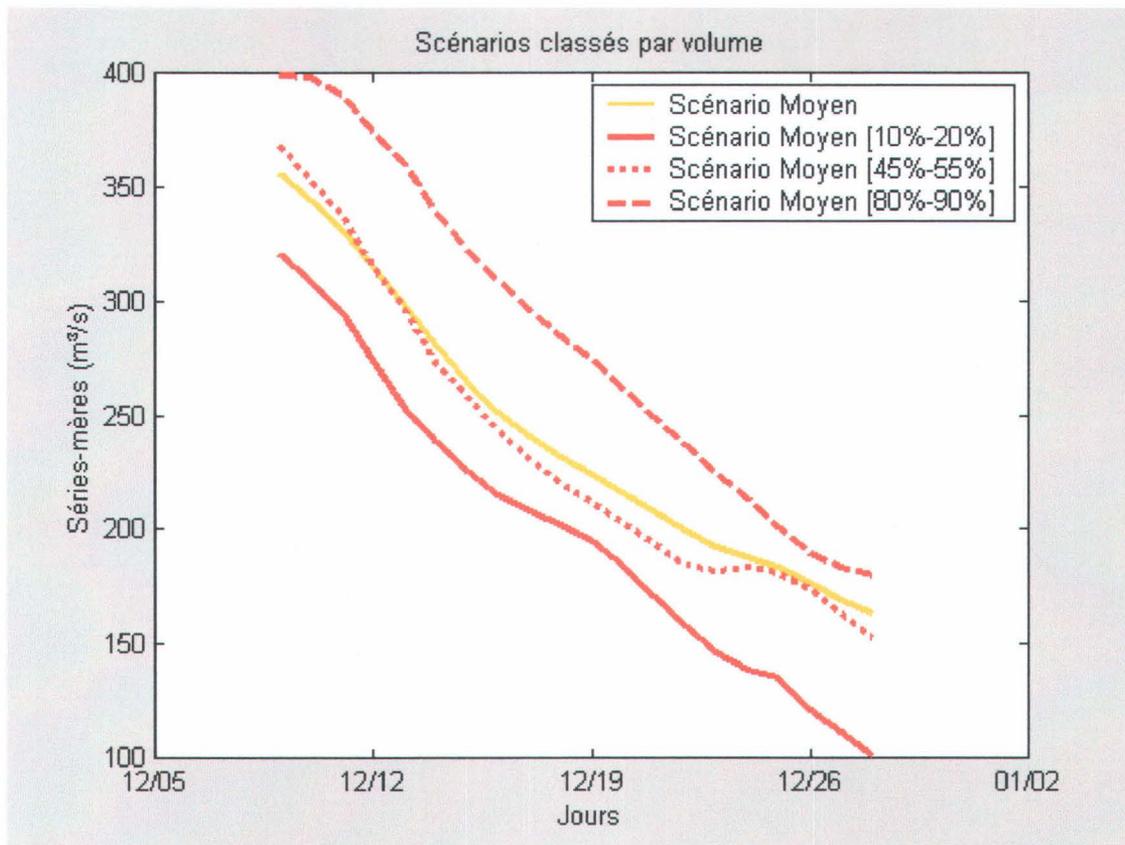


Figure A.9 Scénarios synthétiques moyens, 9-12-1999, bruit, VPP, transition (20 jours)

La figure A.9 présente les scénarios, classés par volume, calculés sur 20 jours à partir des séries synthétiques plutôt qu'à partir des séries mères. On observe une assez bonne concordance entre les résultats obtenus à partir des séries-mères (figure A.8) et à partir des séries synthétiques (figure A.9).

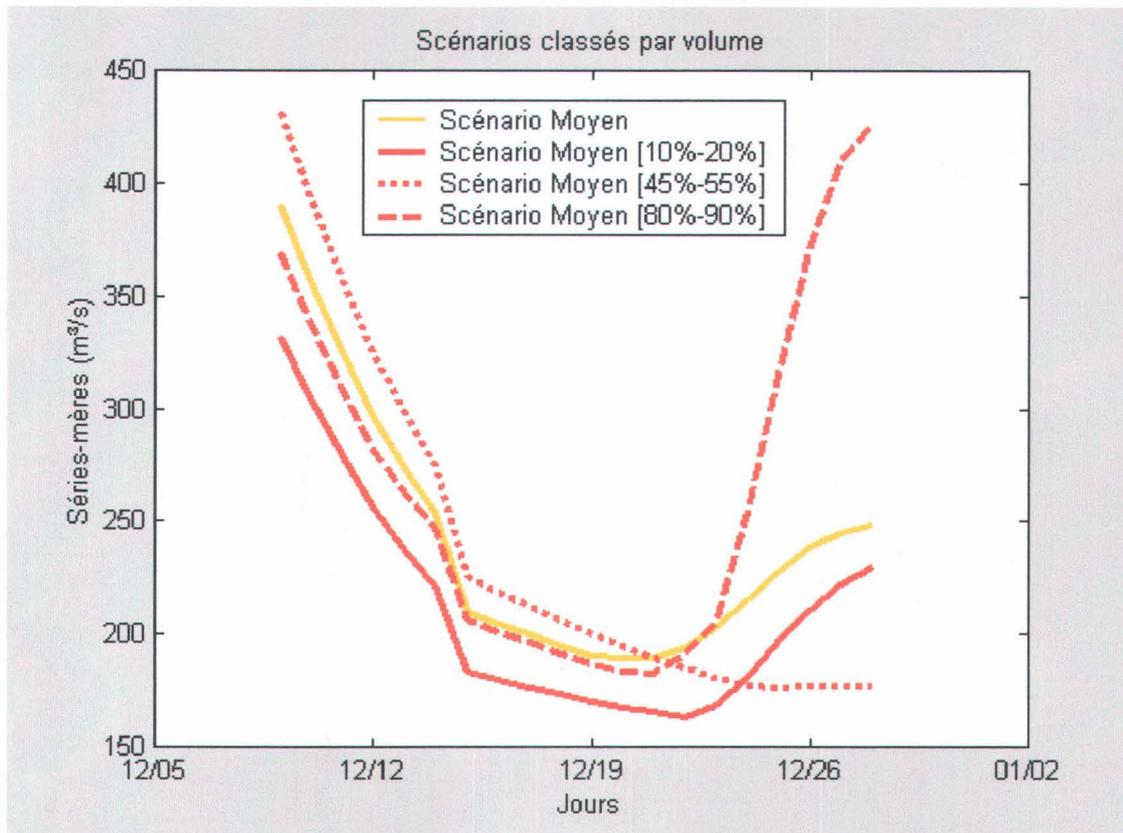


Figure A.10 Scénarios moyens, séries-mères 9-12-1999 générées par le SSEP (20 jours)

La figure A.10 présente les scénarios, classés par volume, calculés sur 20 jours à partir des séries-mères générées par la version du modèle HSAMI utilisée sur le SSEP. On remarque que le scénario à 85% est plus faible que les scénarios à 15% et 50% pendant les deux premières semaines. C'est toujours la même chose qui explique ces inversions: les apports simulés qui appartiennent à la classe de volume [80%-90%] ont (par hasard) des débits plus faibles pour les premiers jours (rappelons que les variations des premiers jours sont causées par l'ajout d'un bruit uniforme).

A.6 Simulation de 100 jours débutant le 1 mars 1999

Nous avons effectué une seconde simulation débutant le 1 mars 1999. Pour cet essai, nous ne disposons pas des prévisions météorologiques. Cependant, la routine de génération des séries-mères remplace automatiquement les prévisions météorologiques manquantes par des valeurs moyennes tirées de la climatologie. Pour obtenir un état de départ, nous avons reculé la date des variables d'état de 400 jours, puis effectué une simulation de prévision jusqu'au 1 mars 1999.

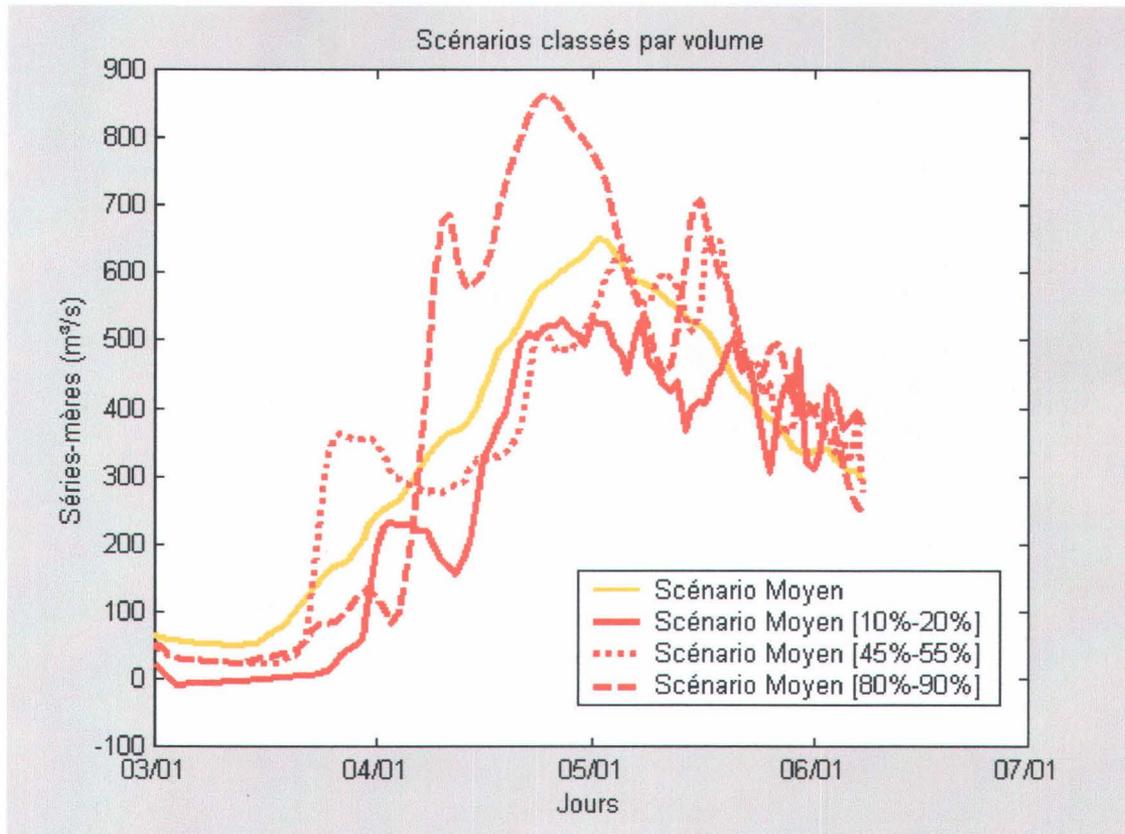


Figure A.11 Scénarios moyens, séries-mères 1-03-1999, bruit, VPP, transition (100 jours)

La figure A.11 présente les scénarios classés par volume, obtenus à partir des séries-mères. On peut remarquer que le scénario à 15% correspond non seulement à une crue ayant une pointe plus basse, mais aussi à une crue un peu plus tardive. Cela peut s'expliquer par le fait que la période de 100 jours de simulation ne se rend pas jusqu'à la fin de la crue. Ainsi, une crue tardive ayant un volume total dans la moyenne sera classée dans les crues de plus faible volume sur la période allant du 1 mars au 8 juin. Ceci illustre bien l'influence de la période d'affichage du graphique sur les scénarios.

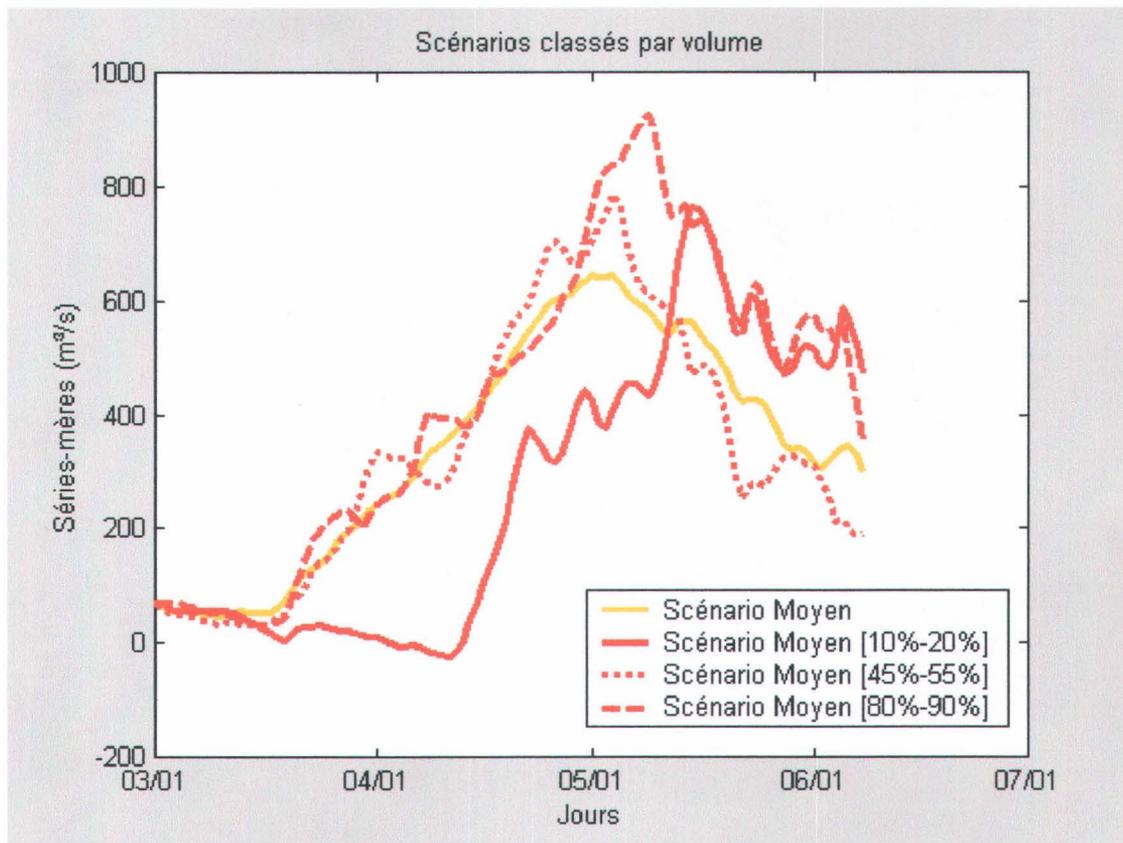


Figure A.12 Scénarios synthétiques moyens, 1-03-1999, bruit, VPP, transition (100 jours)

La figure A.12 présente les scénarios classés par volume, mais cette fois obtenus à partir des séries synthétiques. L'effet remarqué à la figure A.11 est plus évident ici, en raison de la plus grande stabilité des scénarios moyens: le scénario à 15% sur 100 jours comprend des crues tardives. On remarque en particulier que la pointe du scénario à 15% est comparable à celle du scénario à 50%.

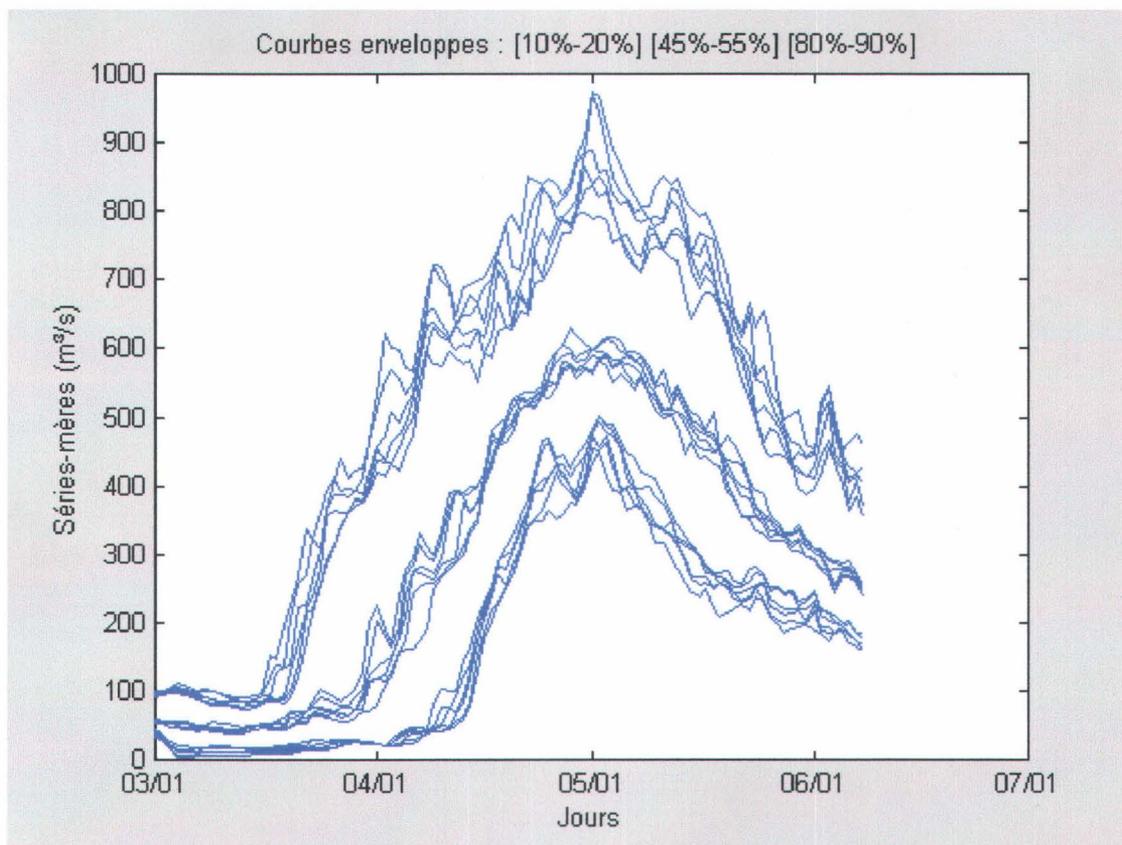


Figure A.13 Courbes enveloppes des séries-mères 1-03-1999, bruit, VPP, transition

La fonction `seriesmeres_graphique` permet de tracer un type de graphique très différent: les courbes enveloppes. Sur ces graphiques, on retrouve tous les apports quotidiens simulés appartenant à des classes de probabilités au non dépassement fixées. évidemment, les courbes enveloppes ne peuvent se croiser si les intervalles spécifiés par l'utilisateur sont disjoints. Contrairement au graphique des scénarios classés par volume, les courbes enveloppes ne sont pas influencées par la période d'affichage. Ce graphique nous renseigne sur la distribution marginale quotidienne des apports, et donne une information utile concernant la pointe. En comparant les figures A.13 et A.14, on constate que le modèle de génération de séries synthétiques conserve relativement bien ces distributions marginales.

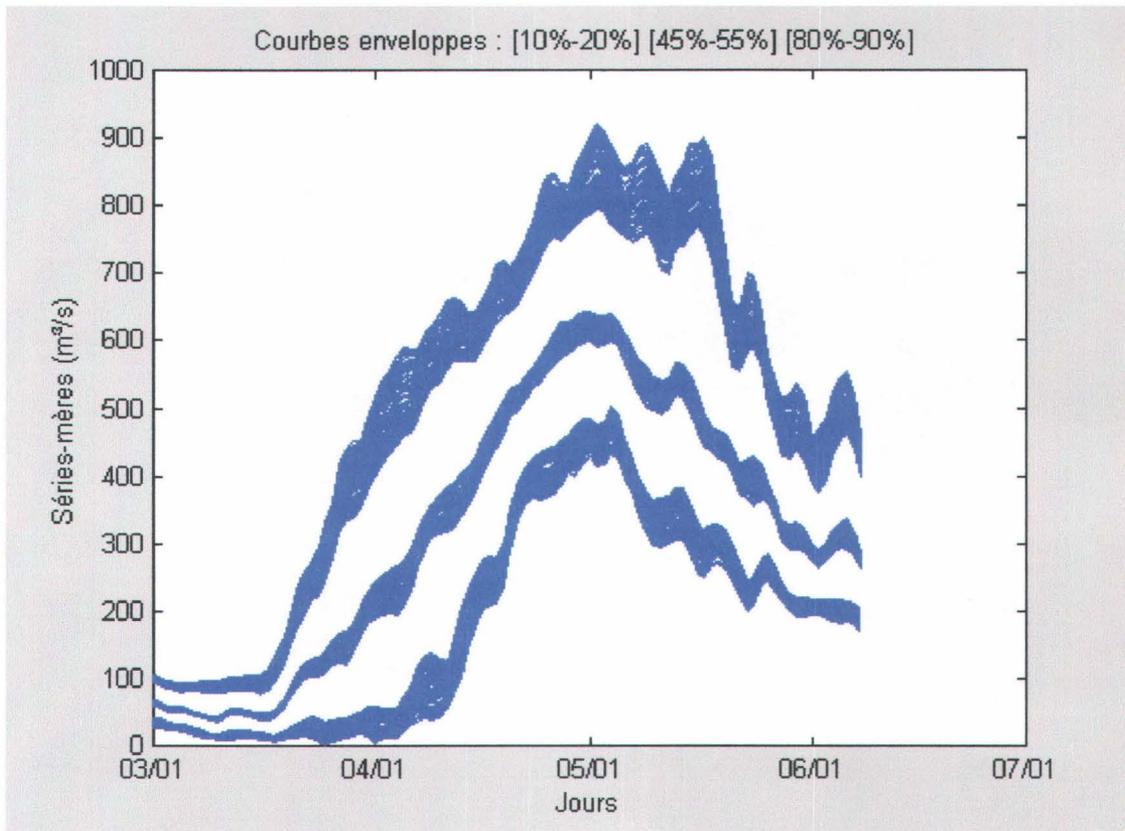


Figure A.14 Courbes enveloppes des séries synthétiques 1-03-1999, bruit, VPP, transition

A.7 Analyse du risque

Les séries synthétiques prévisionnelles peuvent être utilisées pour effectuer une analyse du risque de dépassement de contraintes sur un système hydrique. Nous avons traduit sous *MATLAB* un programme de laminage pour la rivière Gatineau, qui permet de calculer les niveaux des réservoirs Baskatong, Cabonga et Dozois, ainsi que le débit à Maniwaki en fonction des apports et des règles de gestion des ouvrages. Pour une règle de gestion particulière, et pour les séries synthétiques obtenues pour le 1 mars 1999, nous présentons les résultats d'une analyse du risque de débordement des réservoirs Baskatong et Cabonga, ainsi qu'une analyse du risque d'inondation à Maniwaki.

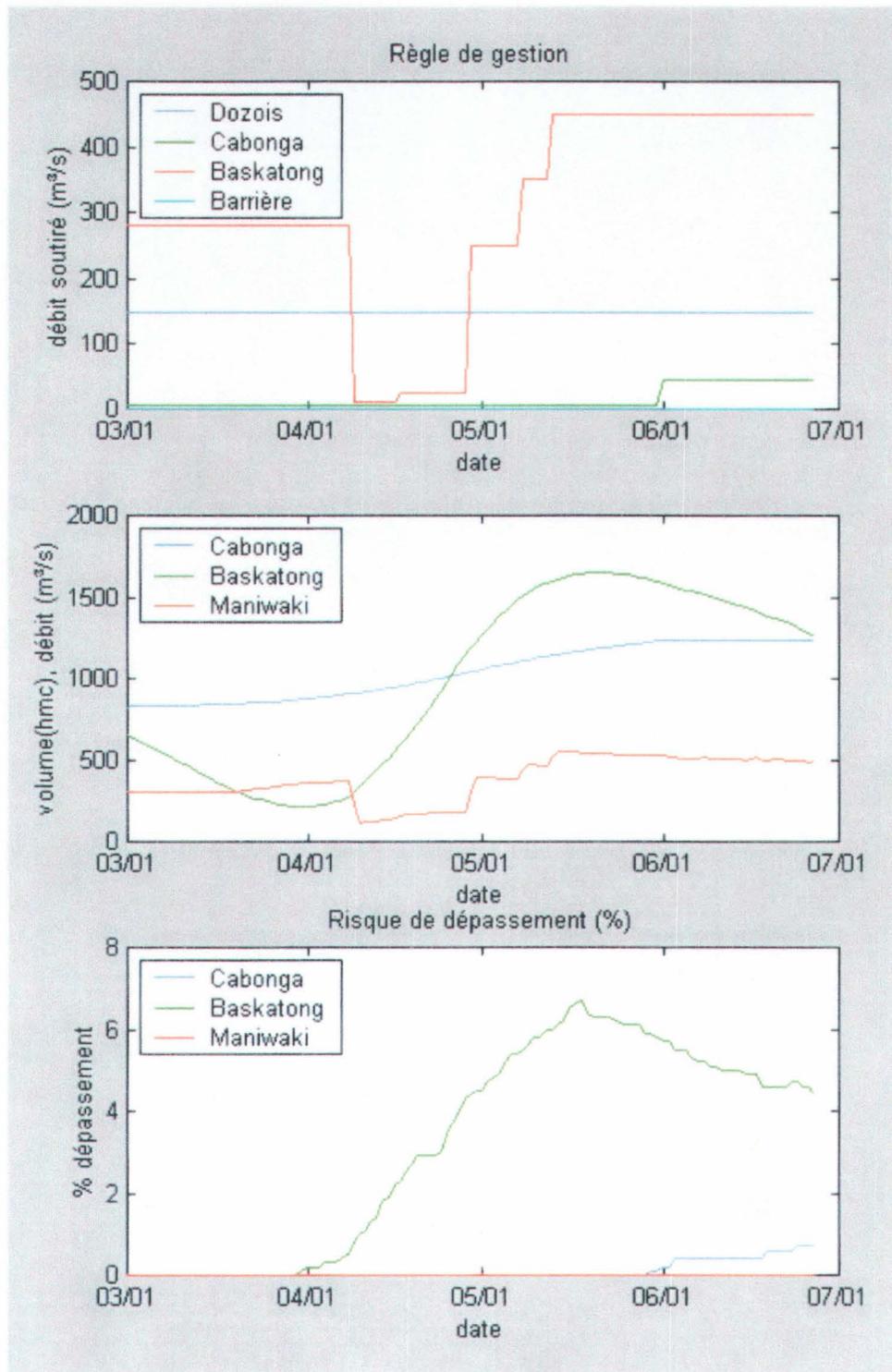


Figure A.15 Analyse du risque pour la Gatineau, 1 mars 1999

Pour une règle de gestion particulière, et pour les séries synthétiques obtenues pour le 1 mars 1999 pour les bassins de Dozois, Baskatong, Cabonga et Paugan, la figure A.15 illustre par trois graphiques les résultats d'une analyse du risque de débordement des réservoirs Baskatong et Cabonga, ainsi qu'une analyse du risque d'inondation à Maniwaki. Dans ce cas, la règle de gestion est spécifiée en fonction de la date. C'est-à-dire que pour chaque réservoir et pour chaque date, on spécifie un débit soutiré quelque soit la prévision des apports et le niveau des réservoirs. Le graphique du haut illustre la règle de gestion à chaque réservoir. Le graphique du centre montre la trajectoire moyenne du volume des réservoirs de Cabonga et Baskatong en fonction du temps, de même que le débit moyen à Maniwaki. Le graphique du bas présente le risque de dépassement de trois contraintes (niveau maximum d'exploitation de Baskatong et Cabonga, débit d'inondation à Maniwaki), calculés à partir de la fréquence de dépassement des contraintes pour les séries synthétiques. Pour cet exemple, on voit que les risques de dépassement des contraintes sont relativement bas. Cependant, le volume maximum moyen emmagasiné à Baskatong est aussi relativement bas (sous les 2000 hm³). Ainsi, il s'agit d'une règle de gestion très sécuritaire, mais qui n'assure pas un remplissage suffisant des réservoirs. En faisant varier la règle de gestion, on pourrait probablement trouver une règle tout aussi sécuritaire, mais permettant un remplissage plus important des réservoirs.

A.8 Conclusion

Les exemples présentés dans ce rapport montrent que l'outil informatique de génération de séries synthétiques prévisionnelles fonctionne correctement. Il sera nécessaire d'évaluer la qualité des séries produites (séries-mères et séries prévisionnelles). Les outils de simulation de prévision d'apport, développés pour la génération du bruit sur les séries-mères, peuvent être utilisés pour valider que les modifications apportées au processus de génération de séries-mères améliorent leur qualité. En ce qui concerne les séries synthétiques, on pourra s'assurer que les caractéristiques statistiques de ces séries sont similaires à celles des séries-mères. Par ce document, nous espérons cependant atteindre deux objectifs:

- d'abord, montrer que le processus de génération de séries synthétiques prévisionnelles fonctionne ;
- mais aussi stimuler la discussion sur les façons de présenter ces séries synthétiques à l'utilisateur.

En particulier, on pourrait songer:

- à lisser les scénarios moyens classés par volume

- à augmenter le nombre de séries synthétiques générées (de 1 000 à 1 0 000, par exemple), de façon à réduire la variabilité des scénarios moyens
- à produire un graphique où l'on montrerait le volume total simulé à ce jour (à partir du premier jour affiché au graphique), avec une bande de confiance facile à interpréter
- à produire un graphique de courbes enveloppes pour lequel la probabilité au non dépassement serait calculée de façon à ce que le volume total sous la courbe corresponde à un volume fixé par l'utilisateur (par exemple, un volume dont la probabilité de non dépassement serait de 15%, 50% ou 85%).

Beaucoup de travail reste à faire, mais maintenant que tous les modules de calcul sont en place nous sommes convaincus qu'il sera possible de développer rapidement, à l'intérieur de l'environnement *MATLAB*, un système de génération de séries synthétiques prévisionnelles convivial, répondant aux besoins des utilisateurs.