

Record Number: 8320
Author, Monographic: Haché, M.//Larouche, B.//Perreault, L.//Mathier, L.//Bobée, B.
Author Role:
Title, Monographic: Validation des apports non contrôlés historiques
Translated Title:
Reprint Status:
Edition:
Author, Subsidiary:
Author Role:
Place of Publication: Québec
Publisher Name: INRS-Eau
Date of Publication: 1994
Original Publication Date: Juillet 1994
Volume Identification:
Extent of Work: xi, 111
Packaging Method: pages incluant 3 annexes
Series Editor:
Series Editor Role:
Series Title: INRS-Eau, Rapport de recherche
Series Volume ID: 423
Location/URL:
ISBN: 2-89146-419-2
Notes: Rapport annuel 1994-1995
Abstract: Rapport rédigé pour la Société d'électrolyse et de chimie Alcan Ltée, groupe Ressource hydrique
16.00\$
Call Number: R000423
Keywords: rapport/ ok/ dl

**VALIDATION DES APPORTS NON
CONTRÔLÉS HISTORIQUES**

VALIDATION DES APPORTS NON CONTRÔLÉS HISTORIQUES

Rapport rédigé pour

**Société d'électrolyse et de chimie Alcan Ltée
Groupe Ressource Hydrique**

par

**Mario Haché
Bruno Larouche
Luc Perreault
Louis Mathier
Bernard Bobée**

**Institut national de la recherche scientifique, INRS-Eau
2800, rue Einstein, Case postale 7500, SAINTE-FOY (Québec), G1V 4C7**

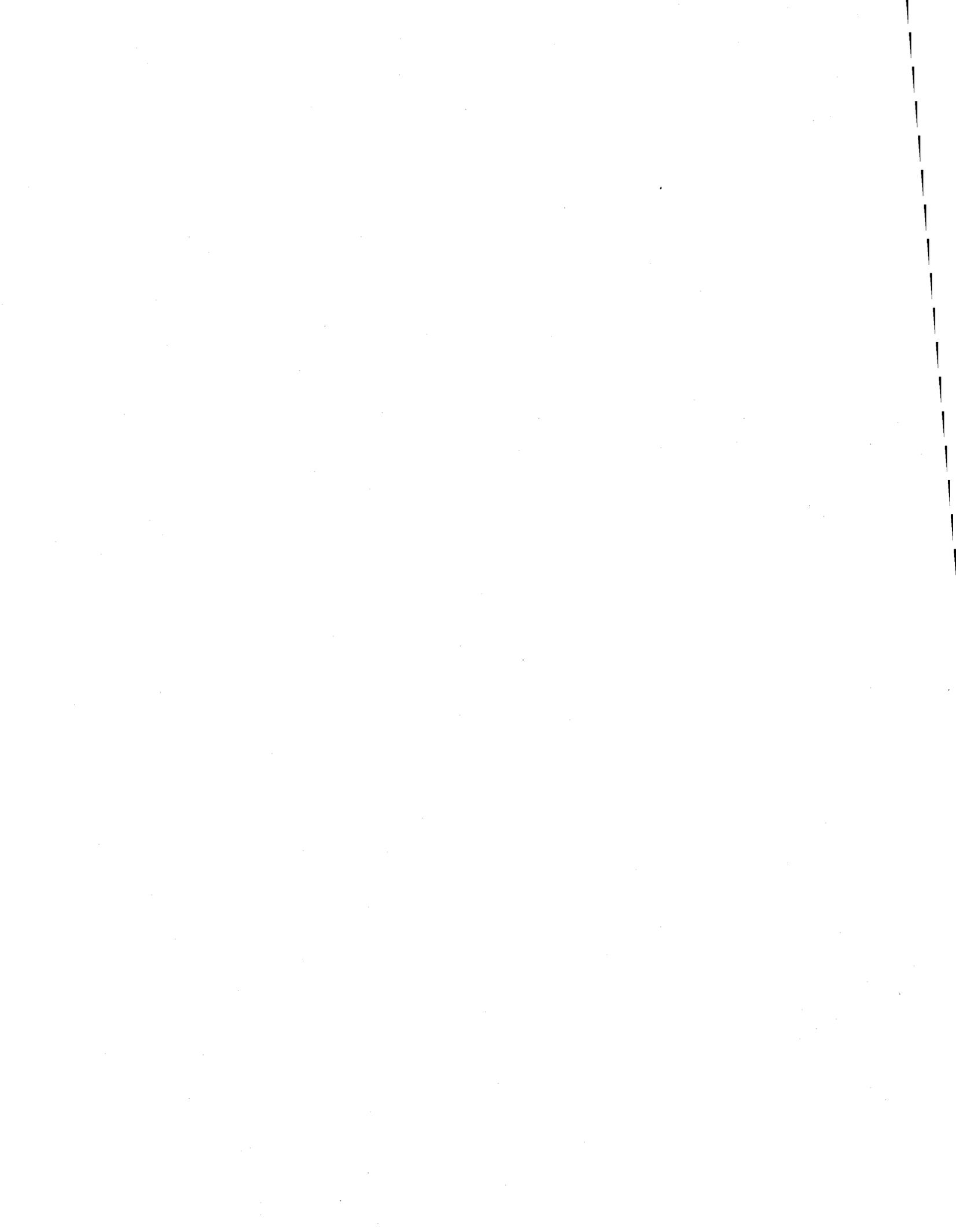
No de commande 030-E34712001

Rapport de recherche No R-423

Juillet 1994

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX	v
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES PRINCIPALES NOTATIONS ET ABBRÉVIATIONS	xi
1 INTRODUCTION	1
1.1 Problématique	1
1.2 Sources d'erreurs	3
1.3 Objectifs du sous-projet A	4
2 DESCRIPTION DES DONNÉES HYDROLOGIQUES UTILISÉES DANS L'ÉTUDE	5
3 DÉTECTION ET CORRECTION DES VALEURS SINGULIÈRES EXTRÊMES	11
4 MODÈLE DE FILTRAGE DES APPORTS NON CONTRÔLÉS	15
4.1 Généralités sur les filtres	15
4.2 Variations "ondes longues et "ondes courtes" des apports non contrôlés ...	17
4.3 Filtre de Hanning	18
5 DÉTERMINATION DU PARAMÈTRE P DU FILTRE DE HANNING	23
5.1 Ruissellement du bassin de drainage	23
5.2 Critères de comparaison	25
5.3 Résultats	28
6 APPLICATION DU FILTRE DE HANNING AUX SITES	33
7 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	37
8 BIBLIOGRAPHIE	39
APPENDICE A Biais entre la somme des ANC filtrés et la somme des ANC non filtrés	41
APPENDICE B Correction des ANC du lac St-Jean à l'aide d'une régression multiple avec les principaux tributaires	45
APPENDICE C Algorithme de filtrage des ANC	51
ANNEXE A Liste des valeurs singulières extrêmes détectées et corrigées	55
ANNEXE B Tableaux de la section 5	61
ANNEXE C Graphiques des ANC corrigés pour trois années témoins	67



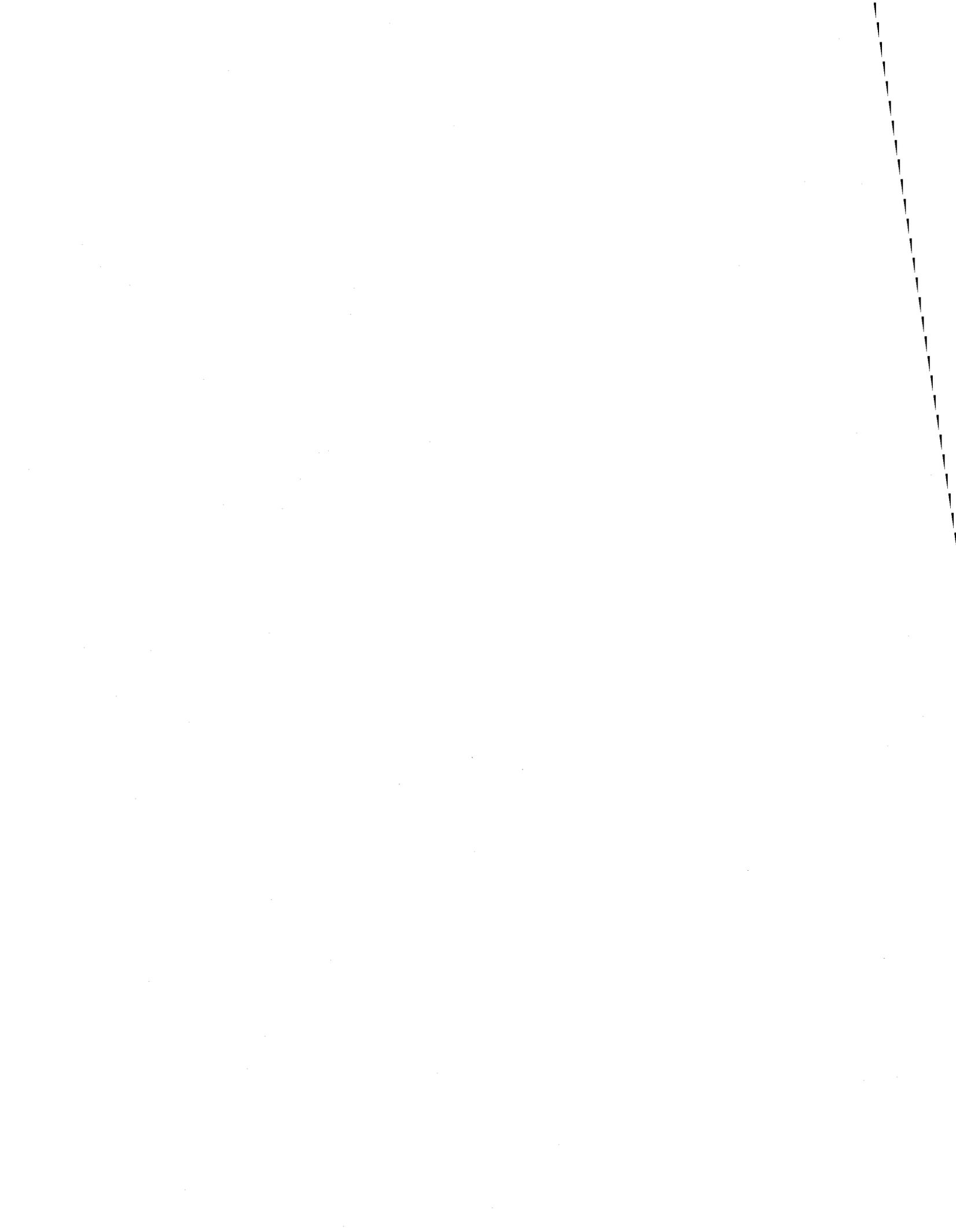
LISTE DES TABLEAUX

Rapport principal

Tableau 1.1	Influence de l'erreur de "1 cm" dans la mesure du niveau d'un réservoir	4
Tableau 2.1	Sites considérés pour l'étude des ANC	5
Tableau 2.2	Rivières jaugées du système hydrique d'ALCAN	6
Tableau 2.3	Superficies moyennes des réservoirs d'ALCAN	7
Tableau 2.4	Seuil déterminant le début de la crue	8
Tableau 4.1	Revue des filtres passe-bas utilisables	18
Tableau 5.1	Affluents jaugés du Lac St-Jean	24
Tableau 5.2	Mesures de tendance centrale de $p1_{opt}$ et $p2_{opt}$ pour le réservoir LSJ	28
Tableau 5.3	Mesures de tendance centrale de $p1_{opt}$ et $p2_{opt}$ pour le réservoir CD	29
Tableau 5.4	Performance moyenne	32
Tableau 6.1	Années témoins choisies pour l'étude	33
Tableau 6.2	Paramètre p du filtre de Hanning choisi pour corriger les ANC	34

Annexes

Tableau A1	Valeurs singulières extrêmes détectées et corrigées (LSJ et CD)	57
Tableau A2	Valeurs singulières extrêmes détectées et corrigées (LM et PD)	58-60
Tableau B1	Rivières utilisées pour calculer SDR	63
Tableau B2	$p1_{opt}$ et $p2_{opt}$ pour le réservoir du lac St-Jean	64
Tableau B3	$p1_{opt}$ et $p2_{opt}$ pour le réservoir de Chute du Diable	65



LISTE DES FIGURES

Rapport principal

Figure 1.1	Calcul de l'apport non contrôlé par bilan hydrique	2
Figure 2.1	Variables hydrologiques utilisées dans l'étude (LSJ - 1980)	9
Figure 3.1	Exemple d'une valeur singulière extrême (LSJ - 1981)	11
Figure 3.2	Détection d'une valeur singulière extrême à partir des résidus standardisés (LSJ - 1981)	14
Figure 4.1	Poids du filtre de Hanning pour différentes valeurs du paramètre p .	19
Figure 4.2	Réponse du filtre de Hanning pour différentes valeurs du paramètre p	20
Figure 5.1	Exemple de la relation entre la somme des débits des rivières (SDR) et l'apport non contrôlé (ANC)	24
Figure 5.2	Exemple graphique de l'écart absolu moyen (EAM) et du coefficient de Nash (N) (LSJ-1979)	27
Figure 5.3	Exemple de trois filtrages avec $p = 4, 5, 6$ ($p_{opt} = 5$) (LSJ - 1980) . .	31

Appendices et annexes

Figure B.1	ANC corrigés par régression multiple avec les débits des principaux tributaires (LSJ-1980)	49
Figure C.1	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac St-Jean (hiver 1963-1964, saison moyenne)	69
Figure C.2	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac St-Jean (hiver 1955-1956, saison sèche)	70
Figure C.3	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac St-Jean (hiver 1966-1967, saison humide)	71
Figure C.4	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac St-Jean (printemps 1959, saison moyenne)	72
Figure C.5	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac St-Jean (printemps 1967, saison sèche)	73
Figure C.6	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac St-Jean (printemps 1976, saison humide)	74
Figure C.7	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac St-Jean (été-automne 1982, saison moyenne)	75
Figure C.8	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac St-Jean (été-automne 1981, saison sèche)	76
Figure C.9	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac St-Jean (été-automne 1966, saison humide)	77
Figure C.10	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Chute du Diable (hiver 1963-1964, saison moyenne) . . .	78
Figure C.11	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Chute du Diable (hiver 1955-1956, saison sèche)	79

Figure C.12	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Chute du Diable (hiver 1966-1967, saison humide)	80
Figure C.13	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Chute du Diable (printemps 1959, saison moyenne) . . .	81
Figure C.14	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Chute du Diable (printemps 1967, saison sèche)	82
Figure C.15	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Chute du Diable (printemps 1976, saison humide)	83
Figure C.16	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Chute du Diable (été-automne 1982, saison moyenne) . .	84
Figure C.17	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Chute du Diable (été-automne 1981, saison sèche)	85
Figure C.18	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Chute du Diable (été-automne 1966, saison humide) . .	86
Figure C.19	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Passes-Dangereuses (hiver 1963-1964, saison moyenne)	87
Figure C.20	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Passes-Dangereuses (hiver 1955-1956, saison sèche) . . .	88
Figure C.21	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Passes-Dangereuses (hiver 1966-1967, saison humide) . .	89
Figure C.22	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Passes-Dangereuses (printemps 1959, saison moyenne) .	90
Figure C.23	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Passes-Dangereuses (printemps 1967, saison sèche)	91
Figure C.24	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Passes-Dangereuses (printemps 1976, saison humide) . .	92
Figure C.25	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Passes-Dangereuses (été-automne 1982, saison moyenne)	93
Figure C.26	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Passes-Dangereuses (été-automne 1981, saison sèche) .	94
Figure C.27	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Passes-Dangereuses (été-automne 1966, saison humide)	95
Figure C.28	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac Manouane (hiver 1963-1964, saison moyenne)	96
Figure C.29	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac Manouane (hiver 1955-1956, saison sèche)	97
Figure C.30	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac Manouane (hiver 1966-1967, saison humide)	98
Figure C.31	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac Manouane (printemps 1959, saison moyenne)	99
Figure C.32	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac Manouane (printemps 1967, saison sèche)	100
Figure C.33	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac Manouane (printemps 1976, saison humide)	101

Figure C.34	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac Manouane (été-automne 1982, saison moyenne) . . .	102
Figure C.35	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac Manouane (été-automne 1981, saison sèche)	103
Figure C.36	Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac Manouane (été-automne 1966, saison humide)	104



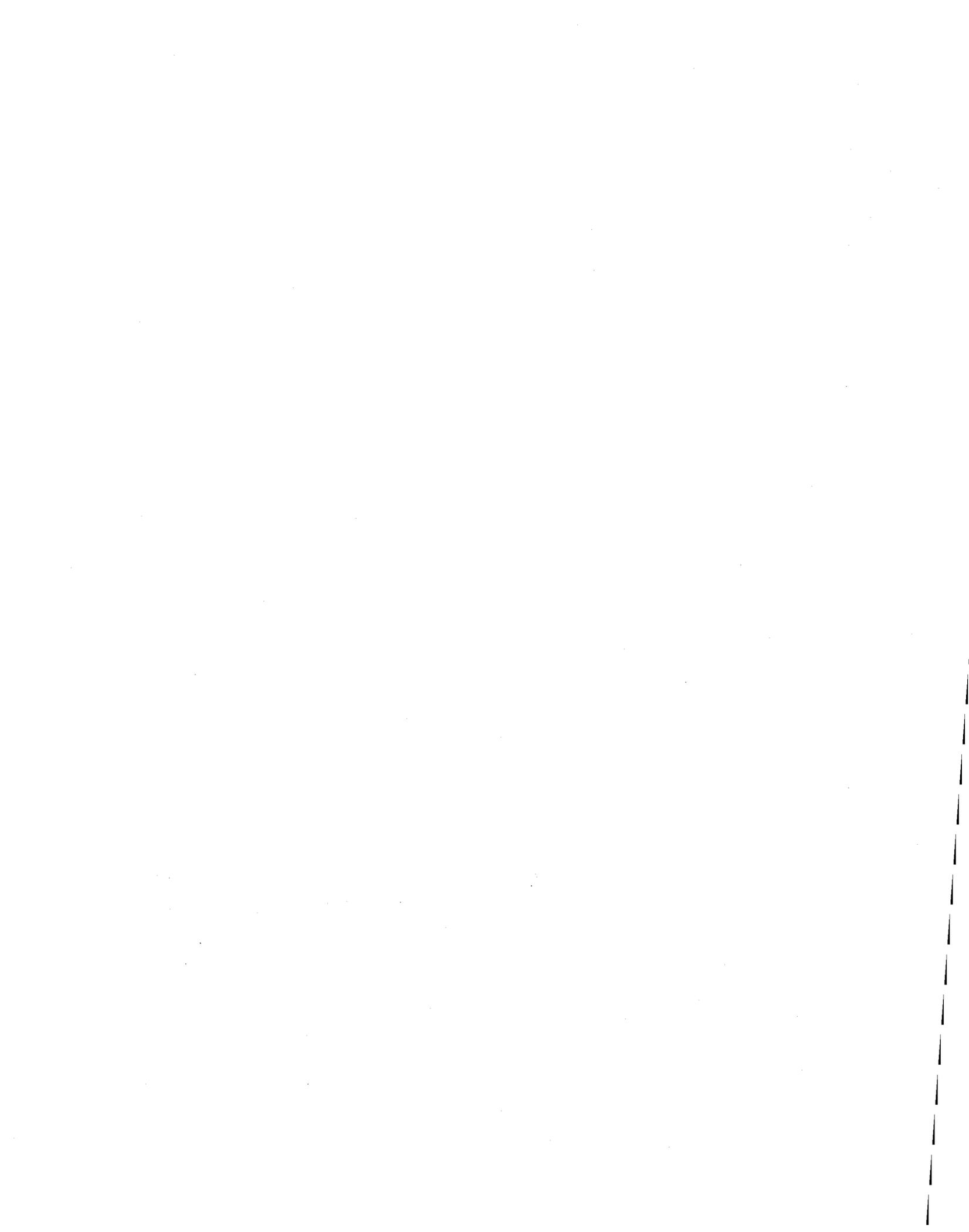
LISTE DES PRINCIPALES NOTATIONS ET ABBRÉVIATIONS

Notations

ANC:	apport non contrôlé
ANC _t :	apport non contrôlé du jour t
ANC' _t :	apport non contrôlé du jour t déduit d'un modèle simple (détection des valeurs singulières extrêmes)
ANC _t *:	apport contrôlé du jour t moins le débit de la précipitation directe sur le réservoir du jour t
ANCF _t *:	ANC _t * filtré par le filtre de Hanning
d _{seuil} :	date marquant le début du printemps
DPL:	débit provoqué par une chute de pluie sur un réservoir
EAM:	écart relatif moyen
f:	fréquence
f _c :	fréquence de coupure
N	coefficient de Nash
p:	paramètre d'un filtre
p _{opt} :	valeur optimale du paramètre du filtre de Hanning
PL:	hauteur de pluie directe sur un réservoir
R(f):	réponse d'un filtre
S:	surface d'un réservoir
SDR:	somme des débits des rivières
SDR*:	somme des débits des rivières réajustée par régression linéaire simple
w _k :	poids d'un filtre

Abbréviations

ASH:	rivière Ashuapmushuan
CD:	Chute du Diable
LM:	lac Manouane
LSJ:	lac St-Jean
MAN:	rivière Manouane
MET:	rivière Métabetchouane
MISBI:	rivière Mistassibi
MISNI:	rivière Mistassini
PD:	Passes-Dangereuses
PP:	rivière Petite Péribonka
SER:	rivière Serpent



1 INTRODUCTION

Le groupe Ressources hydriques (GRH) de la société d'électrolyse et de chimie Alcan Ltée (SÉCAL) a demandé à l'INRS-Eau de réaliser deux études techniques portant sur:

- A. Validation et correction des apports non contrôlés journaliers historiques
- B. Étude préliminaire - validation et correction des apports non contrôlés en temps réel

Ce document vise à présenter les résultats des travaux de recherches concernant le sous-projet A.

1.1 Problématique

La connaissance des apports non contrôlés journaliers (notés *ANC*), c'est-à-dire le ruissellement naturel à un site donné, est essentielle au bon fonctionnement de l'ensemble du système de prévision et de gestion des ressources hydriques d'ALCAN. En effet, c'est à partir de ces apports qu'ALCAN peut gérer à court, moyen et long terme les ressources hydriques dont elle dispose et ainsi:

- optimiser le remplissage des réservoirs et minimiser les volumes d'eau déversés;
- minimiser les risques d'inondation; et
- faciliter la gestion des niveaux des réservoirs;

De plus, ces données servent aussi lors de la calibration et de l'utilisation des modèles hydrologiques déterministes.

L'ANC journalier qui alimente un réservoir est défini comme étant l'apport naturel total en eau que ce réservoir reçoit pendant 24 heures. Cette quantité d'eau tient compte des précipitations directes sur la surface du réservoir et du ruissellement du bassin de drainage qui l'entoure. Il est à noter que cette définition n'inclut pas la décharge provenant d'un

réservoir en amont qui constitue un apport contrôlé. L'ANC ne peut pas être mesuré directement et est en réalité obtenu par l'équation du bilan hydrique. La figure 1.1 et l'équation (1.1) illustrent les principales composantes de ce calcul:

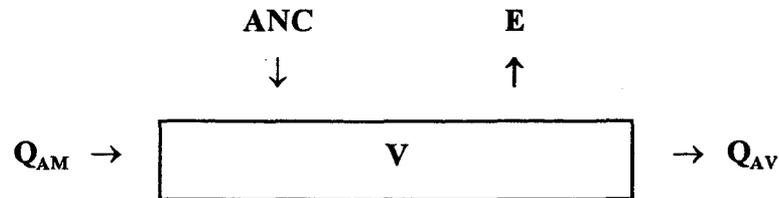


Figure 1.1 Calcul de l'apport non contrôlé par bilan hydrique

$$\frac{\Delta V}{\Delta T} = Q_{AM} - Q_{AV} + ANC - E \quad (1.1)$$

- où
- ANC est l'apport non contrôlé moyen (m^3/s) pendant le temps $\Delta T = T_2 - T_1$;
 - Q_{AM} est le débit moyen (m^3/s) pendant ΔT provenant du site amont;
 - Q_{AV} est le débit moyen (m^3/s) relâché au site pendant ΔT ;
 - E est l'évaporation à la surface du réservoir pendant ΔT ;
 - ΔV est la variation du volume (m^3) du réservoir dans l'intervalle de temps ΔT .

Le terme d'évaporation (E) a été négligé dans cette étude. La détermination de l'ANC dépend donc des termes Q_{am} , Q_{av} et ΔV qui peuvent être entachées d'erreurs importantes. En effet, on peut observer des variations excessives et même des valeurs négatives de cette quantité. La série d'ANC historique est principalement utilisée par l'ALCAN pour diverses études statistiques et pour la calibration des modèles de prévisions hydrologiques. Il importe donc de vérifier et de corriger cette mesure afin de constituer une banque d'apports historiques fiables.

1.2 Sources d'erreurs

L'ANC est fonction de trois termes:

- les débits relachés au site qui sont turbinés pour la production hydro-électrique et déversés;
- les débits ou apports contrôlés provenant du site amont qui arrivent au site avec un certain décalage;
- la variation du volume du réservoir directement déduite du niveau du réservoir.

Les erreurs sur les mesures de chacune de ces trois composantes entraînent des erreurs importantes sur les valeurs calculées de l'ANC.

L'erreur associée aux débits turbinés et déversés est relativement faible (3 à 5%) (Bouillé et al., 1983). L'erreur des débits turbinés provient particulièrement du calcul de la hauteur de chute et parfois de l'inexactitude de la courbe de rendement des turbines. L'erreur relative aux débits déversés résulte de la mesure du niveau du réservoir et de l'ouverture des vannes.

La principale source d'imprécision de l'ANC pour les grands réservoirs provient de la difficulté de connaître le volume exact d'un réservoir. Le tableau 1.1 donne la sensibilité de la mesure du niveau en montrant les conséquences d'une erreur de "1 cm" sur l'estimation de l'ANC des réservoirs d'ALCAN. Ainsi, par exemple, une erreur de "1 cm" sur le niveau du réservoir du lac St-Jean équivaut à un débit de 125 m³/s alors que l'apport non contrôlé journalier moyen correspond à 840 m³/s. En pratique, le volume est estimé à partir des mesures du niveau et de l'équation d'emmagasinement propre au réservoir. Outre l'imprécision de la courbe d'emmagasinement et des jauges limnimétriques (± 1 cm), et les défauts rencontrés aux stations de mesure, la source d'erreur prédominante est due à la non horizontalité de la surface du réservoir. En effet, le réservoir agit en réalité comme un oscillateur mécanique de grande envergure soumis à une multitude de forces externes et internes. Les effets météorologiques (vent, seiche, couverture de glace) et l'exploitation des installations (changement brusque des débits turbinés ou déversés) sont

les principales causes de la déformation du plan d'eau qui induisent des erreurs dans la mesure de niveaux.

Tableau 1.1 Influence de l'erreur de "1 cm" dans la mesure du niveau d'un réservoir

Réservoirs	Débit journalier équivalent (m³/s)	Apport non contrôlé annuel moyen (1943 - 1993) (m³/s)
Lac Manouane (LM)	50	115
Passes-Dangereuses (PD)	30	247
Lac St-Jean (LSJ)	125	834

1.3 Objectifs du sous-projet A

L'objectif principal du sous-projet A est d'élaborer une méthodologie de validation et de correction des apports non contrôlés historiques pour quatre sites d'ALCAN: lac Manouane, Passes-Dangereuses, lac St-Jean et Chute du Diable.

Ce rapport décrit le développement d'une méthode de correction des apports non contrôlés ANC basée sur le principe du filtrage des données. Tout d'abord, nous décrivons brièvement (section 2) les données hydrologiques employées dans l'étude. Nous présentons ensuite (section 3) une méthode de détection et de correction des valeurs singulières extrêmes. Nous discutons brièvement (section 4) des aspects théoriques des modèles de filtrage des données. Nous décrivons (section 5) une procédure qui détermine le paramètre du filtre le plus approprié pour lisser les ANC. Enfin, nous appliquons (section 6) le filtre aux quatre sites et présentons les résultats pour 3 années témoins.

2 DESCRIPTION DES DONNÉES HYDROLOGIQUES UTILISÉES DANS L'ÉTUDE

ALCAN a fourni à l'INRS-Eau une banque de données contenant les niveaux à minuit, les niveaux moyens journaliers, les apports non contrôlés, les débits turbinés et déversés, les débits des rivières et les précipitations directes sur le réservoir; toutes ces données sont mesurées ou calculées sur une base journalière. Cette section a pour objet de faire une brève description des données utilisées dans l'étude. Il s'agit de l'apport non contrôlé, du débit des rivières et de la précipitation directe sur le réservoir.

Les apports non contrôlés (ANC) sont calculés par bilan hydrique sur une base journalière selon l'équation (1.1). La période d'observation ainsi que la superficie du bassin versant pour les quatre sites considérés dans l'étude sont données au tableau 2.1.

Tableau 2.1 Sites considérés pour l'étude des ANC

Site	Notation	Période d'observation	Superficie du bassin (km ²)
Chute du Diable*	CD	1953-1993	9 700
Lac Manouane	LM	1943-1993	5 000
Lac St-Jean	LSJ	1953-1993	46 000
Passes-Dangereuses	PD	1943-1993	11 000

* le site Chute du Diable n'est pas considéré comme un réservoir principal

En général, les débits mesurés en rivières sont de très bonne qualité. Le débit des rivières est important en raison de la contribution substantielle du ruissellement à l'ANC d'un réservoir. Il peut donc nous donner une idée de l'allure générale de la courbe de l'ANC. Le tableau 2.2 donne les périodes d'observation pour lesquelles des mesures en rivières sont disponibles. Les rivières Ashuapmushuan, Métabetchouane, Mistassibi, Mistassini et Petite Péribonka se déversent dans le réservoir lac St-Jean. Elles drainent une surface de 37 860 km² soit 82.3% de la superficie totale du bassin versant du lac St-Jean. L'eau des rivières

Manouane et Serpent s'écoule dans la rivière Péribonka et atteint finalement le site de Chute du Diable.

Tableau 2.2 Rivières jaugées du système hydrique d'ALCAN

Rivière	Notation	Période d'observation	Superficie du bassin versant (km ²)
Ashuapmushuan	ASH	1953 - 1992	15 300
Manouane	MAN	1979 - 1992	3 600
Métabetchouane	MET	1964 - 1992	2 280
Mistassibi	MISBI	1953 - 1992	9 870
Mistassini	MISNI	1953 - 1992	9 320
Petite Péribonka	PP	1974 - 1992	1 090
Serpent	SER	1991 - 1992	2 220

Les précipitations directes sur les réservoirs sont calculées selon le quadrillage ALCAN à partir des stations météorologiques avoisinantes (Thompson et al., 1982). Ces données sont disponibles à partir de 1953 pour les réservoirs du lac St-Jean, du lac Manouane et de Passes-Dangereuses. L'imprécision sur les hauteurs de précipitation est principalement due à:

- l'erreur de mesure;
- la méthode d'interpolation spatiale;
- l'erreur reliée au décalage de la journée climatologique (8h à 8h - pour les stations avec observateurs) par rapport à la période de mesure des niveaux (24h à 24h).

Les hauteurs de précipitation sont converties en débit par la relation suivante:

$$DPL = k PL S \quad (2.1)$$

où DPL est le débit engendré par la précipitation sur le réservoir (m³/s);

PL est la hauteur de précipitation directe sur le réservoir durant une journée (mm/24h);

S est la superficie du réservoir (km²);

k est un facteur de conversion des unités donné par:

$$k = \frac{24h}{86400s} \frac{10^{-4}m}{1mm} \frac{10^6m^2}{1km^2} \quad (2.2)$$

Le tableau 2.3 contient les superficies des réservoirs déterminées pour les différentes saisons. Ces superficies ont été calculées en fonction du niveau moyen des réservoirs par les spécialistes d'ALCAN pour chaque saison. La saison hivernale n'est pas considérée car les précipitations sous forme solide sont habituellement balayées par le vent lorsque la surface du réservoir est gelée. De plus, le site de Chute du Diable n'est pas inclus en raison de sa faible superficie.

Tableau 2.3 Superficies moyennes des réservoirs d'ALCAN

Réservoirs	Superficie moyenne (km ²)		
	Printemps	Été	Automne
LM	395	460	458
PD	200	300	308
LSJ	1055	1105	1100

La figure 2.1 illustre la variabilité temporelle de l'ANC, du débit d'une rivière et de la précipitation sur une période annuelle. Les caractéristiques hydrométéorologiques des bassins varient beaucoup au cours de l'année. Durant l'été et l'automne, les précipitations tombent sous forme liquide et sont disponibles pour l'infiltration et le ruissellement. Durant l'hiver les précipitations tombent sous forme solide et s'accumulent sur le sol. Au printemps, toute la neige accumulée durant l'hiver fond et provoque la crue. La distinction

entre l'été et l'automne est basée sur des critères d'évapotranspiration. La séparation entre ces deux saisons est subtile et souvent les hydrologues les regroupent en une saison unique. Il est primordial de tenir compte de la variabilité temporelle des caractéristiques hydrologiques lors de l'application d'une méthode de validation et de correction des ANC. Pour cette raison, dans cette étude l'année est divisée en quatre saisons distinctes dont les dates limites sont:

Hiver	1 déc. - d_{seuil}
Printemps	($d_{\text{seuil}}+1$) - 30 juin (LM et PD) ($d_{\text{seuil}}+1$) - 15 juin (LSJ et CD)
Été	1 juillet - 31 août (LM et PD) 16 juin - 31 août (LSJ et CD)
Automne	1 sept. - 30 nov.

où: d_{seuil} est la date à laquelle un certain seuil est dépassé par l'ANC durant au moins 4 jours consécutifs ce qui correspond au début de la crue.

Le tableau 2.4 donne le seuil et la date moyenne du début de la crue calculée sur l'ensemble de l'historique pour chacun des réservoirs. Les dates de changement de saison ainsi que les seuils ont été déterminés en collaboration avec les spécialistes d'ALCAN.

Tableau 2.4 Seuil déterminant le début de la crue

Site	Seuil (m^3/s)	Date moyenne du début de la crue
LSJ	700	17 avril
CD	200	23 avril
PD	200	2 mai
LM	100	2 mai

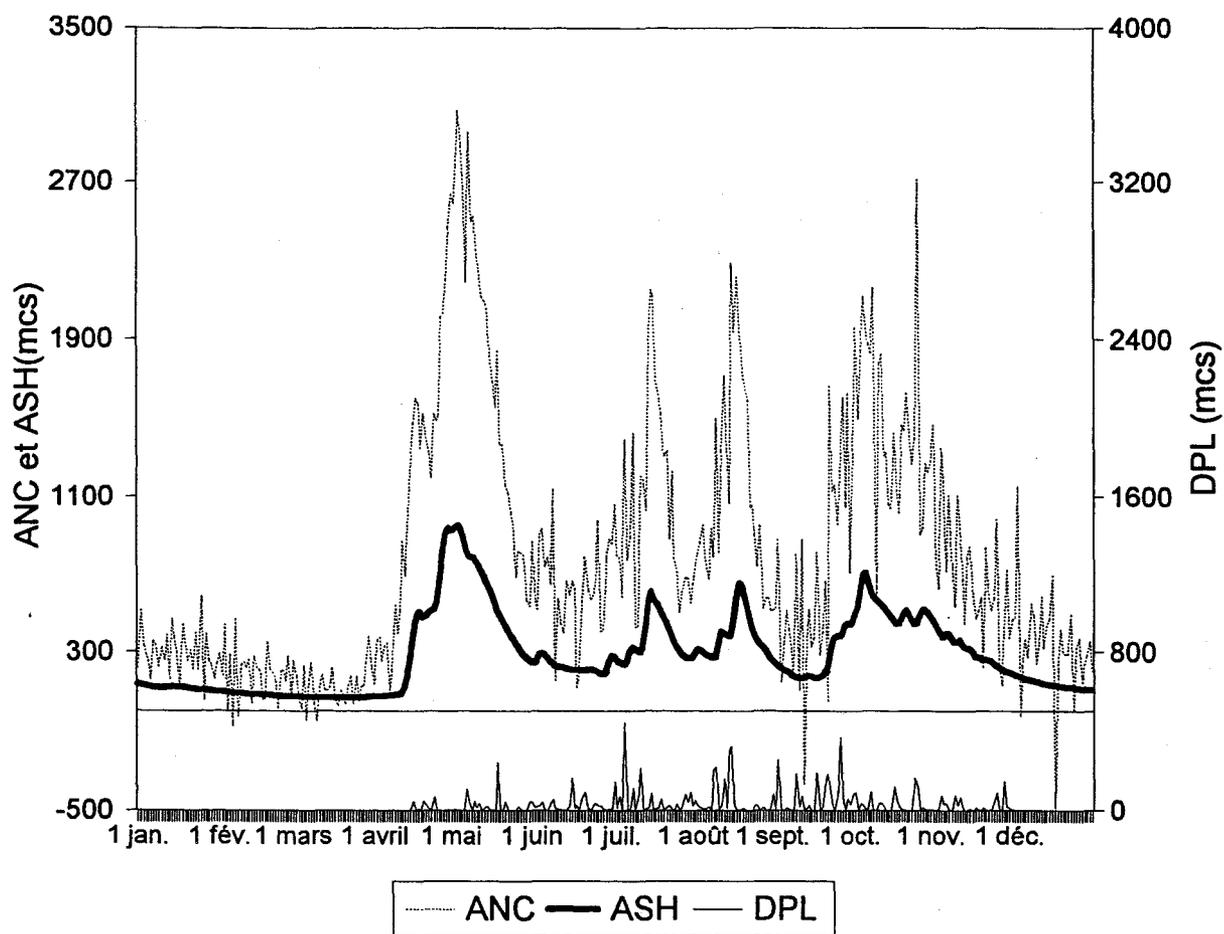


Figure 2.1 Variables hydrologiques utilisées dans l'étude (LSJ - 1980)

3 DÉTECTION ET CORRECTION DES VALEURS SINGULIÈRES EXTRÊMES

L'objectif de cette section est de développer une méthode de détection et de correction des valeurs singulières extrêmes qui peuvent influencer grandement le filtrage des ANC. Les valeurs singulières extrêmes sont des observations isolées situées à l'extérieur de la gamme des variations normalement observées dans les historiques. Notre but est donc d'effectuer un "nettoyage" préliminaire des données avant d'appliquer un filtre. La figure 3.1 donne un exemple d'une valeur singulière extrême typique non désirable.

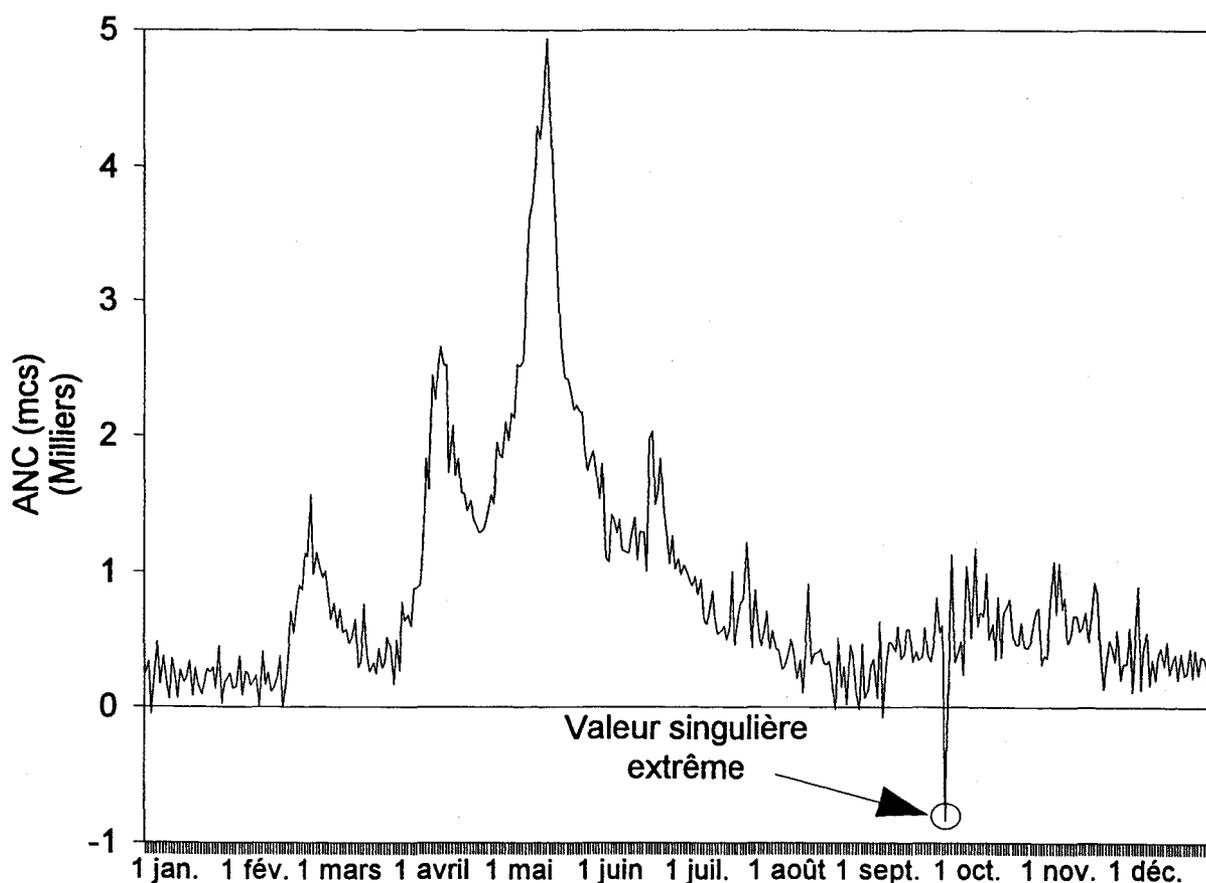


Figure 3.1 Exemple d'une valeur singulière extrême (LSJ - 1981)

Habituellement, la démarche usuelle conduisant à la détection des valeurs singulières consiste à modéliser les ANC et, par la suite, à effectuer un test de détection des données

singulières sur les résidus du modèle considéré. Les valeurs rejetées par le test sont remplacées par les prévisions du modèle.

Une des particularités de la validation des séries historiques par rapport à la validation en temps réel est qu'elle permet de disposer des données avant et après la date de la valeur à tester. Afin d'exploiter cette particularité, nous avons privilégié un modèle simple qui tient compte des deux valeurs adjacentes à celle que l'on veut tester au jour t :

$$ANC'_t = \frac{ANC_{t-1} + ANC_{t+1}}{2} + \epsilon_t \quad (3.1)$$

où ϵ_t est un terme d'erreur aléatoire. Ce modèle est analogue à une moyenne mobile de trois jours à laquelle il manque la valeur centrale.

Les quantités ϵ_t sont estimées par les résidus du modèle (3.1):

$$r_t = ANC'_t - ANC_t \quad (3.2)$$

Et les résidus standardisés sont donnés par:

$$(r_t)_s = \frac{r_t - m_r}{s_r} \quad (3.3)$$

où m_r et s_r sont respectivement la moyenne et l'écart-type des résidus.

L'examen des résidus indique qu'en général les hypothèses de normalité et d'indépendance habituellement nécessaires aux tests de détection des valeurs singulières ne sont pas respectées. Cependant, une observation visuelle des résidus standardisés considérés parallèlement avec les ANC peut servir de détecteur empirique des valeurs singulières extrêmes. La figure 3.2 montre les résidus standardisés des données de l'exemple présenté à la figure 3.1.

Une valeur est soupçonnée singulière extrême si $|(r)_s| \geq 4$. Le seuil de détection a été fixé empiriquement à 4 afin de détecter moins de 0.5% des valeurs d'une série. Un seuil de détection plus petit (par exemple 3) mènerait à la détection de plus de valeurs singulière alors qu'un seuil plus grand (par exemple 5) conduirait à la détection de moins de valeurs. La décision finale de remplacer ou de conserver la valeur détectée se fait par un examen visuel des ANC. Une observation singulière détectée et jugée aberrante visuellement (figure 3.1) est alors remplacée par le résultat de l'équation (3.1).

Afin de tenir compte de la variation des caractéristiques hydrologiques des bassins durant l'année, la procédure de détection des valeurs singulières extrêmes est appliquée saison par saison.

On retrouve à l'annexe A la liste complète des valeurs singulières extrêmes détectées et corrigées pour chacun des réservoirs. On peut remarquer que le nombre de valeurs corrigées est minime (moins de 0.1%) et qu'elles correspondent à des valeurs tout à fait improbables.

Lors de l'examen visuel des ANC, certaines anomalies ont été remarquées pour les réservoirs PD et LM durant les premières années des mesures. En effet:

- l'ANC demeure constant pour le réservoir PD durant les périodes suivantes:

décembre 1944

décembre 1946

décembre 1947-janvier 1948

- l'ANC ne subit aucune fluctuation pour le réservoir LM durant les périodes suivantes:

hiver 1943

hiver 1943-1944

hiver 1945

Les données de ces périodes n'ont pas fait l'objet de correction particulière avant de procéder au filtrage.

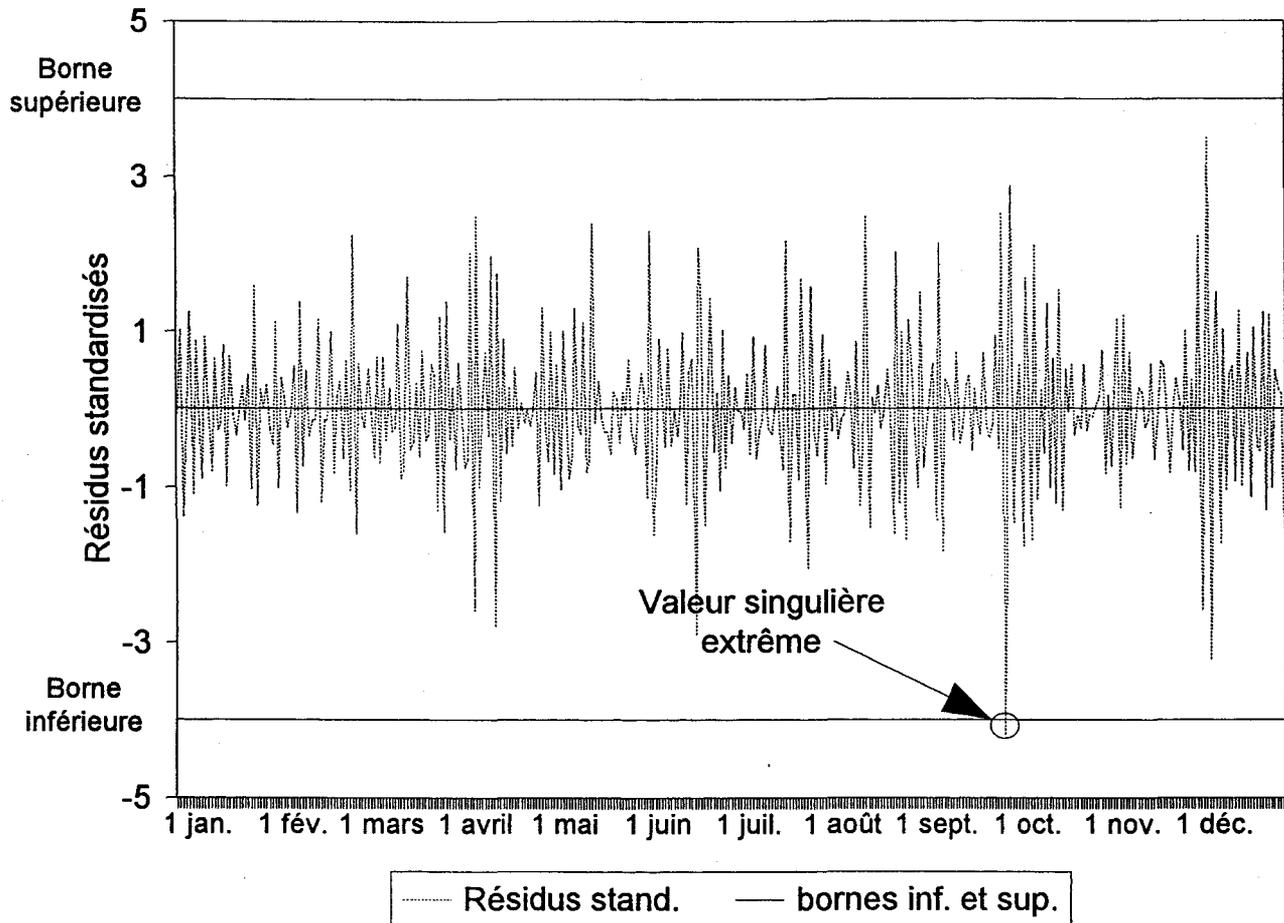


Figure 3.2 Détection d'une valeur singulière extrême à partir des résidus standardisés (LSJ - 1981)

4 MODÈLE DE FILTRAGE DES APPORTS NON CONTRÔLÉS

4.1 Généralités sur les filtres

L'objectif d'un filtre est de transformer une variable X en une variable lissée Y en utilisant la relation linéaire:

$$y_t = \sum_{k=-p}^p w_k x_{t+k} \quad (4.1)$$

Le paramètre p détermine la largeur de la fenêtre du filtre ($2p+1$) et les quantités w_k sont les poids du filtre et ils répondent aux deux conditions suivantes:

$$\sum_{k=-p}^p w_k = 1 \quad \text{et} \quad w_k = w_{-k} \quad (4.2)$$

Afin de bien comprendre l'effet du filtre sur la série originale de la variable X , il est indispensable d'introduire quelques notions élémentaires d'analyse spectrale. Un complément d'information à ce sujet peut être trouvé dans Yevjevich (1972).

L'analyse spectrale consiste à décomposer une série originale d'une variable X en une série de Fourier, c'est-à-dire en une somme de fonctions sinus et cosinus de différentes fréquences:

$$x_t = a_0 + \sum_{j=1}^q [a_j \cos(2\pi f_j t) + b_j \sin(2\pi f_j t)] \quad (4.3)$$

où a_j et b_j sont les coefficients de Fourier;
 f_j est la fréquence.

L'objectif de l'analyse spectrale est d'identifier les fréquences pour lesquelles les fonctions sinus et cosinus contribuent le plus à la série x_t . Le périodogramme est l'outil graphique utilisé pour donner une image des contributions relatives associées à chacune des

fréquences. En abscisse du périodogramme on retrouve la fréquence et en ordonnée la quantité:

$$P_j^2 = (a_j^2 + b_j^2)/2 \quad (4.4)$$

Une propriété intéressante du périodogramme est que la somme des P_j^2 est égale à la variance de la série x_t . Il est donc possible d'interpréter la valeur P_j^2 comme étant la contribution de la fréquence f_j à la variance de la série x_t .

La densité spectrale $X(f)$ est obtenue en filtrant les quantités P_j^2 . D'une manière analogue aux quantités P_j^2 , l'intégrale de la densité spectrale, c'est-à-dire l'aire sous la courbe $X(f)$, est égale à la variance de la série x_t . De plus, la relation entre la fonction de densité spectrale d'une variable filtrée Y et celle d'une variable non filtrée X (équation 4.1) s'écrit:

$$Y(f) = R(f)X(f) \quad (4.5)$$

où f est la fréquence du filtre

$R(f)$ est la réponse du filtre

La réponse du filtre permet d'évaluer l'effet du filtrage sur l'amplitude des ondes sinusoïdales et cosinusoïdales. Voici les quatre principaux changements que peuvent subir ces ondes:

$R(f) > 1$	<i>amplification</i>
$R(f) = 1$	<i>aucun changement</i>
$R(f) < 1$	<i>diminution</i>
$R(f) = 0$	<i>annulation</i>

À partir de la forme de la réponse du filtre, trois types de filtre sont définis:

<i>passé-bas:</i>	la réponse diminue lorsque la fréquence augmente
<i>passé-haut:</i>	la réponse augmente lorsque la fréquence augmente
<i>passé-bande:</i>	la réponse atteint un maximum à une certaine fréquence

4.2 Variations "ondes longues et "ondes courtes" des apports non contrôlés

Afin de déterminer le type de filtre approprié pour traiter les ANC, il faut tout d'abord analyser les variations que subissent les ANC. La figure 2.1 (section 2) illustre les fluctuations des ANC durant une année. On remarque immédiatement que les ANC présentent deux types de variations:

- Des variations de longues périodes correspondant à la variation saisonnière des précipitations sur le bassin et à la fonte de la neige durant le printemps. Ces variations sont représentatives des phénomènes à mesurer et elles doivent être retenues dans le processus de validation.
- Des variations de courtes périodes attribuables à l'effet du vent, aux précipitations directes sur le réservoir, aux erreurs d'instrumentation et aux manoeuvres des ouvrages d'évacuation. Toutes ces variations de courtes fréquences sont non désirables sauf celles associées aux précipitations directes sur le réservoir.

Un filtre du type passe-bas permet de partager les variations de courtes périodes et celles de longues périodes. La réponse idéale du filtre passe-bas est:

$$R(f) = \begin{cases} 1 & \text{pour } 0 < f < f_c \text{ (aucun changement)} \\ 0 & \text{pour } f > f_c \text{ (annulation)} \end{cases}$$

où f_c est la fréquence de coupure entre les ondes longues et les ondes courtes.

Le tableau 4.1 présente divers filtres passe-bas qui ont été proposés par différents auteurs. Tous ces filtres ont une bonne réponse, sauf celui de la moyenne mobile, et ils donnent tous des résultats similaires. En pratique, les résultats sont surtout influencés par la largeur de la fenêtre de filtrage $(2p+1)$.

Tableau 4.1 Revue des filtres passe-bas utilisables

Filtres	Poids w_k non normalisés
Moyenne mobile (Essenwanger, 1985)	1
Binomiale (Essenwanger, 1985)	$\binom{2p}{k+p}$
Kaiser (1966)	$I_0[\beta\sqrt{1-(k/p)^2}]/I_0(\beta)$
Blackman et Tukey (1958)	$a+(1-a)\cos(k\pi/p)$ $a = 0.54$ Hamming $a = 0.50$ Hanning
Parzen (1960)	$1-k^2/p^2$
Lanczos (Duchon, 1979)	$\frac{\sin(2\pi f_c k)}{\pi k} \frac{\sin(\pi k/p)}{\pi k/p}$

Remarques:

- $k = 0, \dots, p$ et $w_{-k} = w_k$
- I_0 est la fonction modifiée de Bessel du premier type d'ordre 0
- f_c est la fréquence de coupure
- β est un paramètre contrôlant la fonction de réponse

Le filtre que nous avons choisi pour lisser les ANC est le filtre de Hanning (Blackman et Tukey, 1958). Ce filtre bien connu a été préféré aux autres en raison de la simplicité des poids w_k et du bon comportement de la réponse $R(f)$. La section qui suit traite plus en détail du filtre de Hanning.

4.3 Filtre de Hanning

Le filtre de Hanning est un cas particulier du filtre développé par Blackman et Tukey (1958) lorsque $a = 1/2$. Les poids normalisés sont donnés par la relation suivante:

$$w_k = \frac{1 + \cos(\pi k/p)}{2p} \quad k = -p, \dots, 1, 0, 1, \dots, p \quad (4.6)$$

Les poids situés aux extrémités de la fenêtre sont nuls ($w_{-p} = w_p = 0$). Ainsi, les valeurs ANC_{t-p} et ANC_{t+p} n'influencent pas le calcul de la valeur filtrée de ANC_t . De plus, le filtre n'a aucun effet sur la série lorsque $p = 1$. La figure 4.1 illustre le comportement des poids pour différentes valeurs du paramètre p . On remarque que la valeur centrale correspond au poids le plus grand et que w_k décroît plus ou moins rapidement selon la valeur p en s'approchant des extrémités de la fenêtre de filtrage.

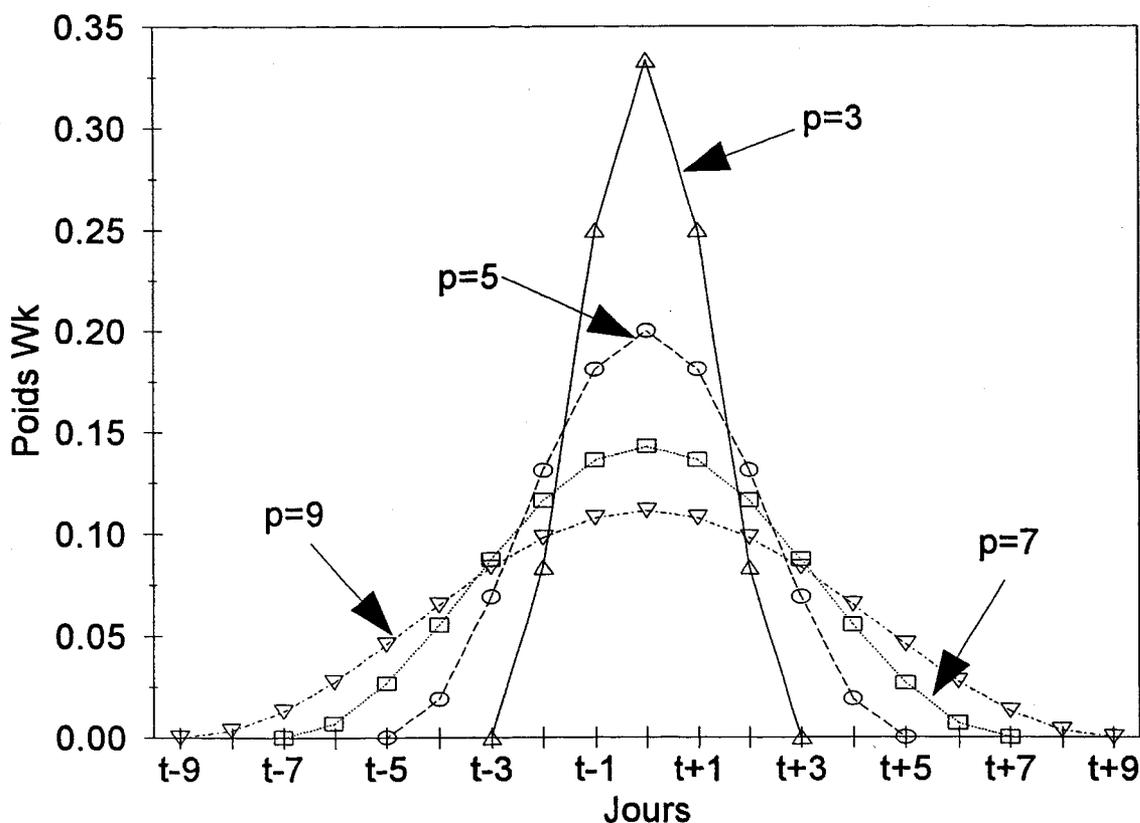


Figure 4.1 Poids du filtre de Hanning pour différentes valeurs du paramètre p

La réponse du filtre de Hanning est donnée par:

$$R(f) = \frac{\sin(2\pi pf)}{2p \tan(\pi f)} \left[1 - \left(\frac{\sin(\pi f)}{\sin(\pi/2p)} \right)^2 \right]^{-1} \quad (4.7)$$

La fréquence de coupure f_c qui détermine les ondes qui sont conservées par le filtre et celles qui sont éliminées est donnée par la première racine de l'équation (4.7). Pour le filtre de Hanning, on a $f_c = 1/p$. Le paramètre p représente donc la période de coupure entre les ondes longues et les ondes courtes. Par exemple, pour $p = 3$ jours ($f_c = 1/3 \text{ j}^{-1}$), les variations de période supérieure à 3 jours sont conservées par le filtre alors que les variations de période inférieure à trois jours sont éliminées. La figure 4.2 illustre la réponse du filtre de Hanning pour différentes valeurs du paramètre p .

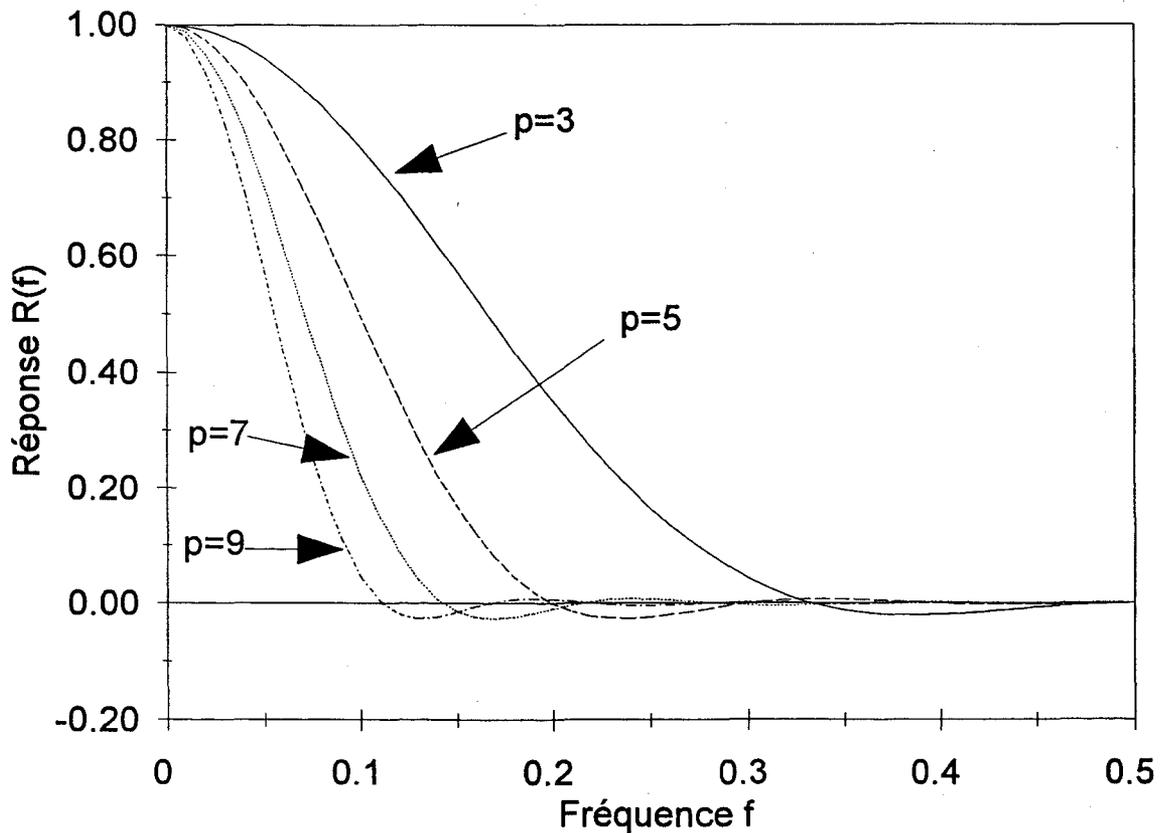


Figure 4.2 Réponse du filtre de Hanning pour différentes valeurs du paramètre p

Les filtres passe-bas, en particulier le filtre de Hanning, possèdent toutefois trois faiblesses pour la modélisation des séries d'apports:

- 1) Le filtre a tendance à abaisser les pointes de crue. Ce problème peut être minimisé en conseillant un filtrage léger au cours du printemps (p petit).
- 2) Le filtre élimine les variations dues aux précipitations directes sur le réservoir. La solution envisagée pour résoudre ce problème consiste à soustraire des ANC les précipitations correspondantes, de filtrer ensuite les valeurs ainsi obtenues et finalement d'ajouter les précipitations aux données filtrées.
- 3) La somme des valeurs filtrées sur une certaine période de temps n'est pas égale à la somme des valeurs non filtrées sur la même période. En effet, on montre que (appendice A) :

$$\sum_{t=1}^n ANCF_t = \sum_{t=1}^n ANC_t + \Delta \quad (4.7)$$

où $ANCF_t$ est la valeur filtrée au jour t et

$$\Delta = \sum_{j=1}^p w_j \sum_{t=1}^J [ANC_{t-j} - ANC_{n-j+t} + ANC_{n+t} - ANC_t] \quad (4.8)$$

Ainsi, la moyenne des valeurs filtrées n'est pas égale à la moyenne des valeurs non filtrées. Cependant, une étude empirique montre que ce biais, pour une période de 30 jours, est inférieur à 1% lorsque $p = 5$ et autour de 3% lorsque $p=9$.

5 DÉTERMINATION DU PARAMÈTRE P DU FILTRE DE HANNING

Le paramètre p détermine la largeur de la fenêtre de filtrage ($2p+1$) et la fréquence de coupure entre les variations qui sont conservées et celles qui sont éliminées ($f_c=1/p$). La sévérité du filtrage dépend directement du paramètre p . Plus p est grand, plus la fenêtre de filtrage est grande et plus la fréquence de coupure est petite (lissage sévère). D'un autre côté, plus p est petit, plus la fenêtre de filtrage est petite et plus la fréquence de coupure est grande (filtrage léger). Le choix entre un lissage léger ou un lissage sévère se fait sur la base d'observations visuelles des résultats. La décision finale repose sur l'expérience des spécialistes qui connaissent bien le phénomène. Cette section a pour but de développer un indicateur objectif pour nous aider dans le choix du paramètre p .

5.1 Ruissellement du bassin de drainage

Comme on l'a mentionné à la section 1.1, le ruissellement du bassin de drainage constitue la contribution majeure à l'apport non contrôlé d'un réservoir. En fait, le ruissellement correspond à l'apport non contrôlé moins les précipitations directes sur le réservoir plus l'évaporation à la surface du réservoir. Les mesures de ruissellement donnent donc une image réaliste de l'allure des variations de l'ANC.

Les débits des principaux affluents (tableau 5.1) du réservoir du lac St-Jean (LSJ) sont mesurés. On remarque que plus de 80% de la superficie du réservoir LSJ est jaugée. La somme des débits de ces rivières (notée SDR) représente donc une contribution substantielle à l'ANC pour ce réservoir. La figure 5.1 illustre de manière nette le lien entre les deux variables SDR et ANC pour le lac St-Jean. Puisque les débits des rivières représentent très bien l'ANC, ils ont été employés pour corriger cette donnée. L'appendice B présente une méthode de correction des ANC basée sur une régression multiple en fonction des débits des affluents du LSJ considérés comme variables indépendantes.

Tableau 5.1 Affluents jaugés du Lac St-Jean

Rivières*	Superficie du bassin (km ²)	Pourcentage du bassin total (%)
ASH-AV	15 300	33.3
MET	2 280	5.0
MISBI	9 320	20.3
MISNI	9 870	21.5
PP	1 090	2.4
Tributaires non jaugés	8 140	17.6
Total	46 000	100.0

* voir liste p. xi

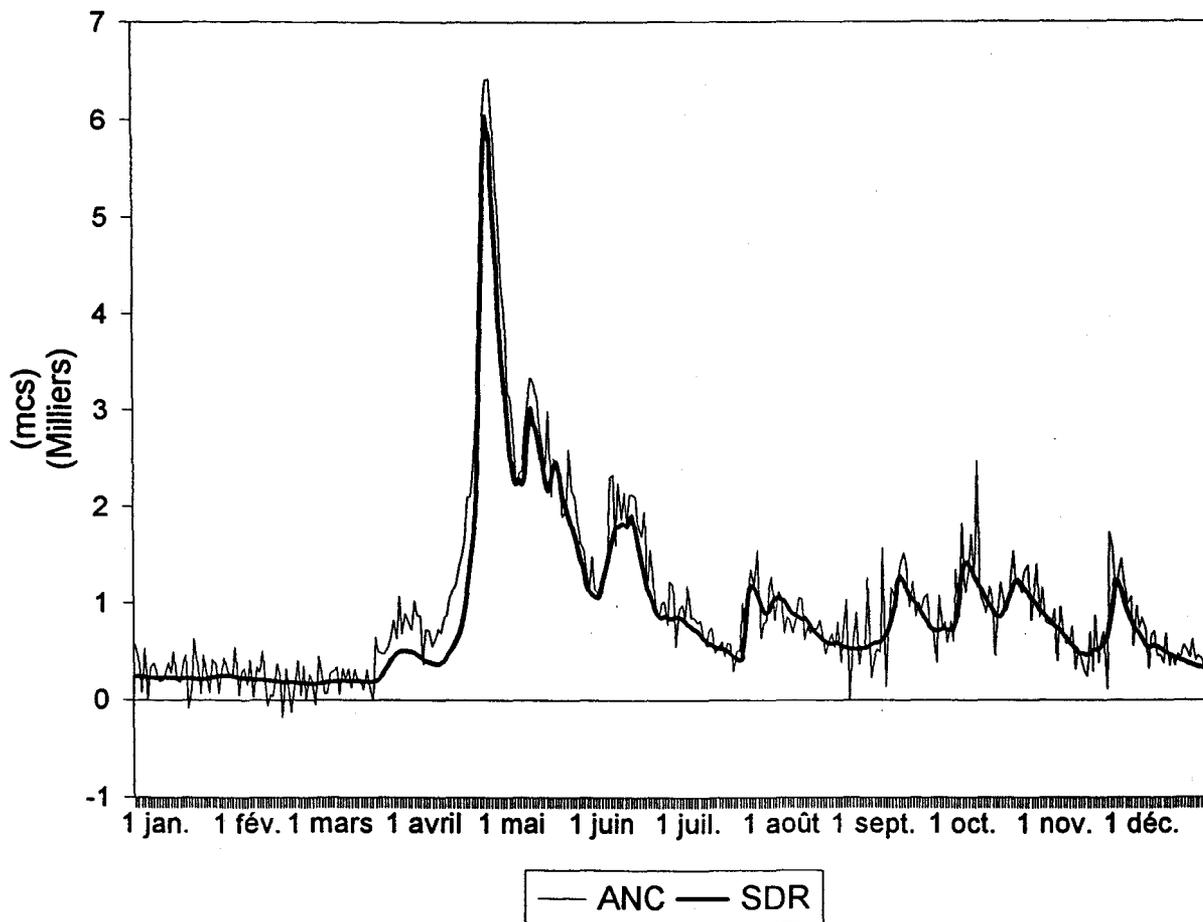


Figure 5.1 Exemple de la relation entre la somme des débits des rivières (SDR) et l'apport non contrôlé (ANC)

La quantité SDR rend donc possible la comparaison des résultats du filtrage pour différentes valeurs du paramètre p. Afin de préserver les fluctuations de courtes durées causées par la pluie, les précipitations directes sur le réservoir (DPL) sont soustraites de l'ANC. La quantité résultante est notée ANC*. Ensuite, puisque la variable SDR ne représente qu'une proportion du ruissellement sur le bassin, une régression simple entre SDR et ANC* est appliquée saison par saison. Le résultat de la régression, noté SDR*, est ainsi plus représentative du ruissellement total. Le tableau B1 de l'annexe B donne la liste des rivières disponibles pour la régression.

5.2 Critères de comparaison

Deux critères de comparaison sont retenus pour quantifier la qualité du filtrage de la quantité ANC* par rapport à SDR* et ainsi déterminer le paramètre p optimal. Le premier est l'écart absolu moyen:

$$EAM(p) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |ANCF(p)_i^* - SDR_i^*| \quad (5.1)$$

où EAM(p) est l'écart absolu moyen en m³/s correspondant à un paramètre de filtrage p;

ANCF(p)_i* en m³/s est la valeur filtrée (paramètre p) de l'apport non contrôlé moins la précipitation au jour i;

SDR_i* en m³/s est la somme des débits des rivières réajustée par régression au jour i;

n est le nombre de jour de la période (habituellement une saison) où s'effectue la comparaison.

On remarque que plus le filtrage est voisin de la cible SDR* plus EAM(p) est petit alors que plus le filtrage est éloigné de la cible plus EAM(p) est élevé. La valeur du paramètre

p qui minimise la quantité $EAM(p)$ est donc celle qui donne le meilleur résultat. Cette valeur est notée $p1_{opt}$.

Le deuxième critère de comparaison utilisé est le coefficient de Nash (Nash et Sutcliffe, 1970):

$$N(p) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (ANCF(p)_i^* - SDR_i^*)^2}{\sum_{i=1}^n (SDR_i^* - m_{SDR^*})^2} \quad (5.2)$$

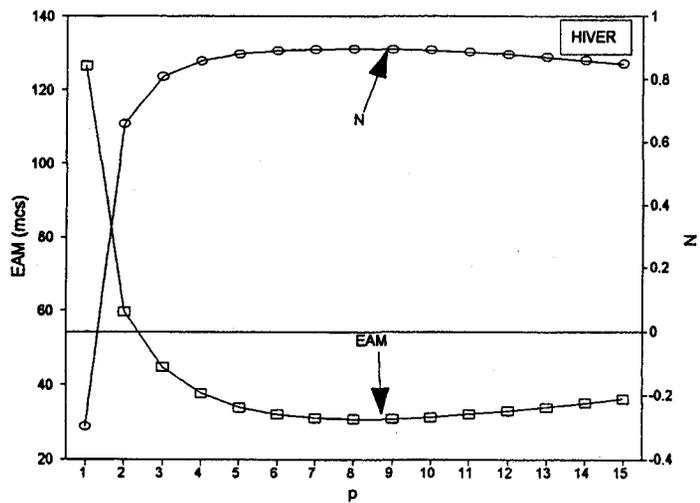
où $N(p)$ est le coefficient de Nash correspondant à un paramètre de filtrage p ;
 $ANCF(p)_i^*$, SDR_i^* et n ont les mêmes définitions que dans l'équation 5.1;
 m_{sdr^*} est la moyenne de la variable SDR^* pour la période de durée n .

En fait, le coefficient de Nash est équivalent au coefficient de détermination d'une régression simple. Ainsi, l'équation 5.2 exprime la proportion de la variance de la série SDR^* expliquée par le filtrage. La valeur du paramètre p conduisant au meilleur résultat correspond au coefficient de Nash N le plus voisin de 1. Cette valeur est notée $p2_{opt}$.

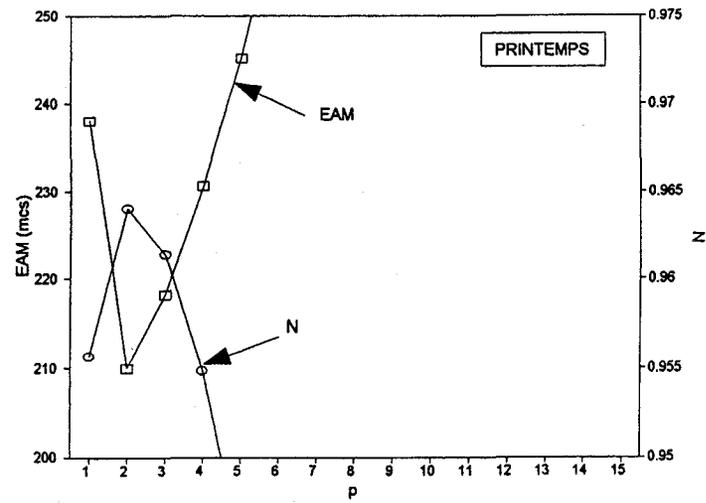
La valeur optimale du paramètre p pour représenter les mêmes variations que les rivières, notée p_{opt} , correspond à un compromis entre $p1_{opt}$ et $p2_{opt}$.

La figure 5.2 montre un exemple typique de $EAM(p)$ et $N(P)$ pour les quatre saisons considérées dans l'étude. On remarque que les deux courbes sont à peu près symétriques. Pour cette raison, nous allons seulement décrire le comportement de $EAM(p)$:

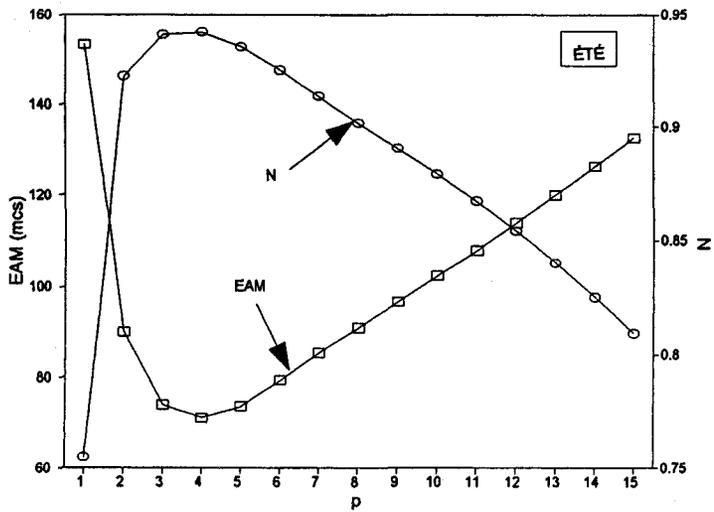
- Pour la saison hivernale, l'EAM décroît rapidement pour atteindre un plateau et puis croît lentement.
- Lors de la crue, l'EAM atteint rapidement une valeur minimum et puis augmente brusquement.



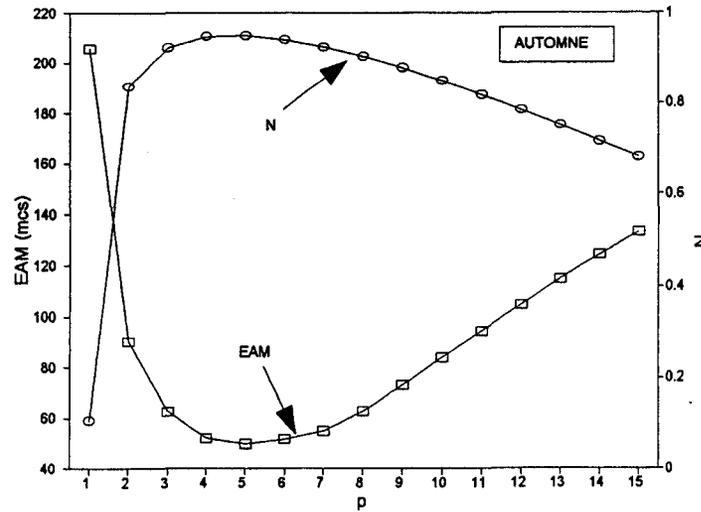
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 5.2 Exemple graphique de l'écart absolu moyen (EAM) et du coefficient de Nash (N) (LSJ-1979)

- L'EAM de l'été et de l'automne ont un comportement très similaire. L'EAM diminue rapidement, atteint une valeur minimum et, par la suite, augmente.

5.3 Résultats

Les quantités ANC* pour le réservoir du lac St-Jean (LSJ) sont filtrées pour des valeurs du paramètre p variant de 1 à 15 et le calcul des critères de comparaison est effectué pour chaque année et chacune des saisons. Le tableau B2 de l'annexe B présente les valeurs de $p_{1_{opt}}$ et $p_{2_{opt}}$ ainsi obtenues. Le tableau 5.2 résume les résultats obtenus. La moyenne, le mode et la médiane de $p_{1_{opt}}$ et $p_{2_{opt}}$ y sont donnés. Il n'y a pas de résultats pour l'hiver car la valeur limite $p=15$ a été dépassée ($p_{1_{opt}}$ ou $p_{2_{opt}} > 15$) à plusieurs reprises et il n'a donc pas été possible de calculer les mesures de tendance centrale pour cette saison. On retrouve également les statistiques de $p_{1_{opt}}$ et $p_{2_{opt}}$ calculées lorsque l'été et l'automne sont regroupées en une seule saison.

Tableau 5.2 Mesures de tendance centrale de $p_{1_{opt}}$ et $p_{2_{opt}}$ pour le réservoir LSJ

Tendance centrale	Écart absolu moyen				Coefficient de Nash			
	Print.	Été	Aut.	Été-Aut.	Print.	Été	Aut.	Été-Aut.
Moyenne	3.7	4.5	5.0	4.7	3.7	4.3	5.0	4.4
Mode	3.0	5.0	5.0	5.0	3.0	4.0	5.0	5.0
Médiane	3.0	4.5	5.0	5.0	3.0	4.0	5.0	5.0

La moyenne est généralement différente de la médiane et du mode. Ceci est tout à fait normal car la moyenne est très influencée par les valeurs extrêmes. Le mode et la médiane sont, quant à eux, des mesures peu influencées par les valeurs extrêmes. Les conclusions qui ressortent de l'analyse des résultats indiquent qu'en général:

- le paramètre p optimal en période de crue est $p_{opt}=3$;
- l'été et l'automne peuvent être regroupées en une seule saison avec un paramètre

$$p_{opt}=5;$$

- le paramètre p_{opt} en hiver est élevé (parfois supérieur à 15).

Il est également possible de déterminer la valeur de p_{opt} pour le réservoir CD de la même manière que pour le réservoir LSJ. La méthode utilisée est similaire à celle développée pour le lac St-Jean. Dans le cas du réservoir CD, la quantité SDR est égale au débit de la rivière Manouane et les précipitations directes sont négligées en raison de la faible superficie du réservoir. La superficie jaugée par la rivière Manouane représente 37% de la superficie du bassin de drainage du réservoir CD. Les valeurs de $p1_{opt}$ et $p2_{opt}$ pour chaque année et pour les quatre saisons considérées sont présentées au tableau B3 de l'annexe B. Le tableau 5.3 résume à l'aide des mesures de tendance centrale de $p1_{opt}$ et $p2_{opt}$ les résultats obtenus pour le réservoir CD.

Tableau 5.3 Mesures de tendance centrale de $p1_{opt}$ et $p2_{opt}$ pour le réservoir CD

Tendance centrale	Écart absolu moyen				Coefficient de Nash			
	Print.	Été	Aut.	Été-Aut.	Print.	Été	Aut.	Été-Aut.
Moyenne	2.7	4.2	3.3	3.7	2.2	4.6	3.5	3.8
Mode	2.0	3.0	2.0	3.0	2.0	3.0	2.0	3.0
Médiane	2.0	3.0	3.0	3.0	2.0	3.0	3.0	3.0

Les conclusions qui ressortent des résultats pour le site CD sont:

- le paramètre optimal au printemps est $p_{opt}=2$;
- l'été et l'automne peuvent être regroupées en une seule saison avec un paramètre $p_{opt}=3$;
- le paramètre p_{opt} en hiver est élevé (parfois supérieur à 15).

Les résultats du site CD ne coïncident pas avec ceux obtenus pour le réservoir LSJ. Plusieurs raisons peuvent expliquer cette différence:

- les ANC du site CD sont mesurés avec plus de précision que les ANC du réservoir LSJ en raison de la faible superficie du réservoir CD;
- la superficie jaugée ne représente que 37 % du bassin de drainage;
- la station hydrométrique de la rivière Manouane est située à près de 160 km du site CD;
- une grande partie de l'erreur sur les ANC est causée par le délai des apports contrôlés de Chute-des-Passes qui est supposé fixe mais qui varie en réalité.

La valeur moyenne ou médiane de p_{opt} n'est pas nécessairement la meilleure valeur du paramètre p pour modéliser les ANC. Par exemple, la valeur moyenne de p_{opt} peut, d'une part, représenter adéquatement les variations observées pour les rivières mais, d'autre part, sous-estimer les pointes de crue. Il importe donc d'étudier la sensibilité des critères de comparaison en fonction du choix du paramètre p . Cette étude, nous permettra de connaître la marge de manoeuvre quant au choix du paramètre p . La figure 5.3 illustre trois filtrages effectués avec les valeurs $p = 4, 5$ et 6 . On remarque que la différence entre les 3 courbes est minime.

Afin de quantifier de manière objective l'écart de performance entre les différents filtrages, on introduit deux critères correspondant à $EAM(p)$ et $N(p)$ respectivement:

$$EAM_p(p) = 100 \frac{EAM(1) - EAM(p)}{EAM(1)} \quad (5.3)$$

$$N_p(p) = 100 \frac{N(p) - N(1)}{1 - N(1)} \quad (5.4)$$

où $EAM(1)$ et $N(1)$ correspondent à $p=1$, c'est-à-dire l'ANC* non filtré.

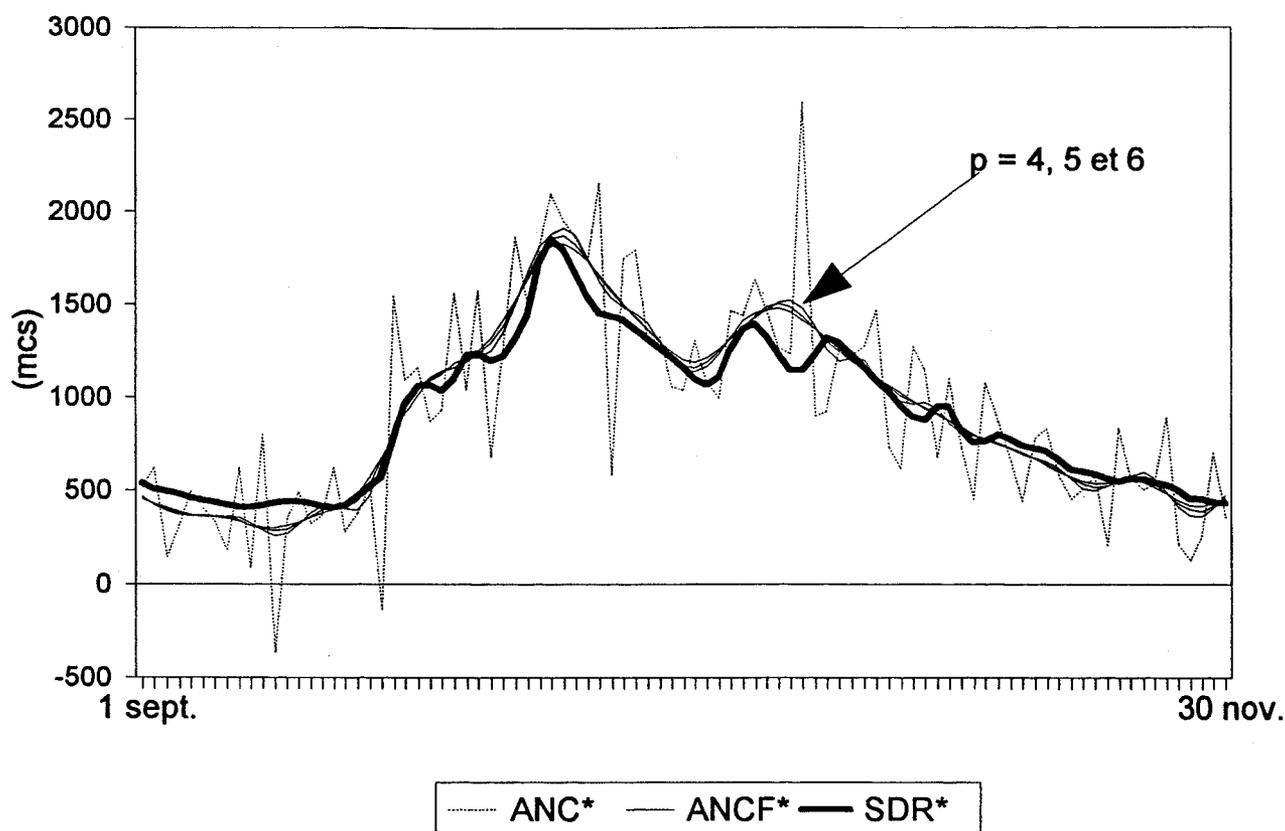


Figure 5.3 Exemple de trois filtrages avec $p = 4, 5, 6$ ($p_{opt} = 5$) (LSJ - 1980)

La quantité $EAM_p(p)$ exprime en pourcentage la diminution de l'écart absolu moyen entre SDR^* et ANC^* lorsque l'on filtre la série avec un paramètre p . La quantité $N_p(p)$ exprime en pourcentage de la variance totale non expliquée par la série non filtrée, l'amélioration apportée par la série filtrée avec le paramètre p .

Le tableau 5.4 présente les performances moyennes des séries filtrées avec les paramètres de filtrage ($p_{opt}-1$), p_{opt} et ($p_{opt}+1$) pour le réservoir LSJ. Par exemple, les quantités $EAM_p(2)$, $EAM_p(3)$ et $EAM_p(4)$ ont été calculées pour les 26 cas où $p_{opt}=3$ dans le tableau B2 (annexe B), ce qui a conduit à des valeurs moyennes de $EAM_p(p)$ égale à 28.9%, 32.5% et 30.0% lorsque p est égal à 2, 3 et 4 respectivement. On remarque que la performance du filtrage est moins efficace avec un paramètre p_{opt} petit. Ceci indique que les ANC lors

de la période de crue (p petit) sont de bonne qualité et que le filtrage apporte une amélioration minimale. Pour les autres saisons, l'amélioration apportée par la série filtrée est considérable. Cependant, la différence entre les performances des séries filtrées pour des valeurs voisines de p_{opt} est petite. Nous pouvons donc en conclure que les valeurs de p voisines de p_{opt} donne des résultats comparables.

Tableau 5.4 Performance moyenne

p_{opt}	EAM _p moyen (%)			N _p moyen (%)		
	$p_{opt}-1$	p_{opt}	$p_{opt}+1$	$p_{opt}-1$	p_{opt}	$p_{opt}+1$
2	-	10.2	7.5	-	29.2	26.4
3	28.9	32.5	30.0	53.4	58.0	54.7
4	45.3	47.4	46.5	67.5	69.0	67.8
5	58.8	59.8	58.7	77.4	78.2	77.4
6	62.4	62.9	62.4	91.9	92.1	91.7
7	57.9	58.2	57.9	77.9	78.0	77.6
≥8	59.2	59.4	59.0	79.0	79.3	78.9

6 APPLICATION DU FILTRE DE HANNING AUX SITES

Dans cette section, nous avons appliqué le filtre de Hanning aux apports non contrôlés journaliers des sites du lac St-Jean, de Chute du Diable, de Passes-Dangereuses et du lac Manouane. Le tableau 6.1 donne la liste des années témoins utilisées pour illustrer les résultats des apports non contrôlés corrigés. On y retrouve également l'apport non contrôlé de la saison exprimé en pourcentage de la moyenne des apports non contrôlés (pour cette même saison) calculée sur les historiques. Les années témoins ont été sélectionnées en collaboration avec les spécialistes d'ALCAN afin de représenter trois régimes hydrologiques différents: moyen, sec et humide. De plus, les années ont été choisies afin d'avoir le même régime hydrologique pour les quatre sites.

Tableau 6.1 Années témoins choisies pour l'étude

Saison	Années témoins	ANC (en % de la moyenne saisonnière)			
		LSJ	CD	PD	LM
Printemps	1959 (m)	101.5	107.0	98.5	103.1
	1967 (s)	77.1	74.1	74.5	75.7
	1976 (h)	143.5	167.9	143.3	133.3
Été-Automne	1982 (m)	92.2	106.1	97.0	105.1
	1981 (s)	68.3	76.4	61.7	78.0
	1966 (h)	139.1	125.5	133.9	136.0
Hiver	1963-1964 (m)	99.1	109.1	91.2	111.1
	1955-1956 (s)	79.9	76.2	86.5	76.8
	1966-1967 (h)	148.3	150.1	148.8	116.6

m: année moyenne

s: année sèche

h: année humide

Le filtre de Hanning est appliqué de manière à tenir compte des variations saisonnières des caractéristiques hydrométéorologiques du bassin. Les limites des saisons sont identiques à celles définies à la section 2. Cependant, l'été et l'automne ont été regroupés en une seule saison puisque le paramètre de filtrage ne semble pas être significativement différent pour ces deux saisons (voir section 5.3). De plus, pour éviter le problème de discontinuité d'une saison à l'autre résultant d'un éventuel changement du paramètre p , la transition se fait graduellement sur une période égale à la différence des deux paramètres. Par exemple, si le paramètre p passe de 9 l'hiver à 3 le printemps, la transition s'effectue sur une période de 6 jours en diminuant le paramètre p d'une unité par jour.

Pour les sites de Chute du Diable et du lac St-Jean, l'information obtenue à la section 5 et l'observation visuelle des ANC corrigés nous ont guidés dans le choix du paramètre p . En ce qui concerne les sites de Passes-Dangereuses et du lac Manouane, aucune mesure en rivières n'est disponible pour nous orienter vers le choix de p_{opt} . Pour remédier à cet inconvénient, nous avons supposé que les résultats obtenus pour le lac St-Jean avaient de fortes chances d'être applicables pour ces deux sites. Le tableau 6.2 contient le paramètre p choisi à chacune des saisons pour les quatre sites.

Tableau 6.2 Paramètre p du filtre de Hanning choisi pour corriger les ANC

Site	Hiver	Printemps	Été-Automne
LSJ	9	2	4
CD	9	2	3
PD	9	2	4
LM	9	2	4

À l'exception du site de Chute du Diable, ce sont les mêmes valeurs du paramètre p qui ont été sélectionnées pour filtrer les données. Comme on l'a précisé à la section 5, un filtrage léger est favorisé pour le site Chute du Diable en raison de la bonne qualité de l'ANC. Un

paramètre de filtrage égale à $(p_{opt} - 1)$ est attribué aux réservoirs lac St-Jean, lac Manouane et Passes-Dangereuse pour les saisons printemps et été-automne. Un paramètre p inférieur aux résultats obtenus à la section 5 a été préféré afin de minimiser l'atténuation des pointes de crue lors du filtrage de l'ANC durant ces deux saisons. Un filtrage sévère a été adopté durant l'hiver dans afin de diminuer au maximum les fluctuations.

Le processus de filtrage a été appliqué à l'ANC diminué des précipitations lorsque ces dernières étaient disponibles (à partir de 1953 pour LSJ, LM et PD). Après le processus de filtrage, les précipitations ont été ajoutées aux valeurs filtrées pour les périodes concernées.

L'annexe C contient les graphiques des ANC corrigés pour les quatre sites et les trois années témoins choisies. L'examen de ces figures montre que:

- Le filtrage sévère durant l'hiver atténue nettement les fluctuations. Pour certains cas, quelques ondulations de longues périodes persistent (figures C7, C17 et C35).
- Le filtrage léger durant le printemps permet de reproduire fidèlement les pointes de crue tout en atténuant les variations non désirables.
- Pour le site de Chute du Diable, la saison (été-automne) est caractérisée par une atténuation remarquable des variations malgré un filtrage léger.
- Pour les sites du lac St-Jean, du Lac Manouane et de Passes-Dangereuses, la saison (été-automne) est caractérisée par une diminution des variations excessives. De plus, les effets des précipitations directes sur les réservoirs se traduisent par les nombreuses pointes durant cette saison. Certaines de ces pointes coïncident avec celles des ANC non corrigés (figure C5 - 24 juillet et 20 août).

- Les variations causées par la pluie sur les réservoirs sont plus importantes pour le lac Manouane que pour le lac St-Jean. Ceci peut s'expliquer par le fait que la superficie du lac Manouane est grande par rapport à son bassin de drainage alors que la superficie du lac St-Jean est petite par rapport à son bassin de drainage.

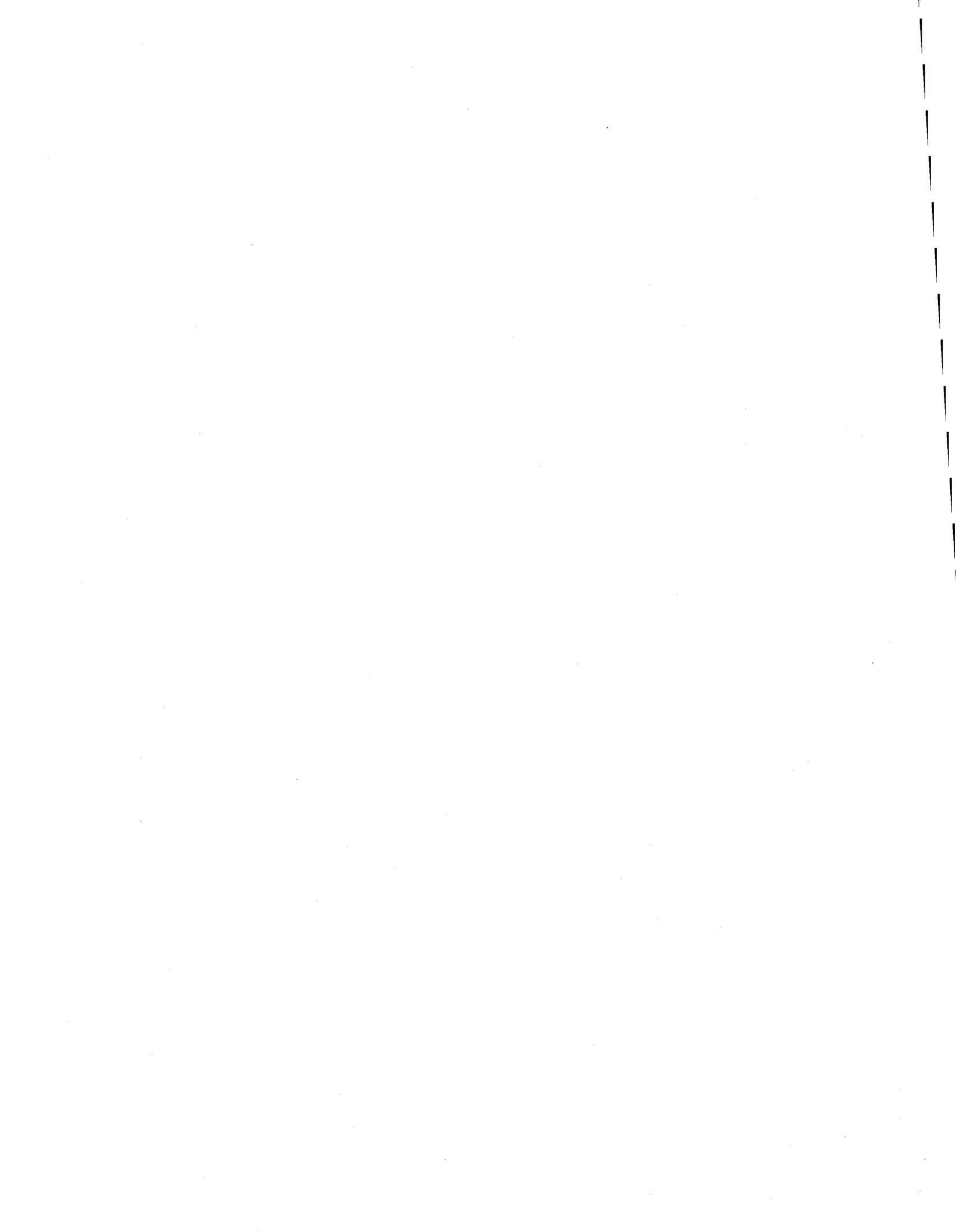
7 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Pour ALCAN il est indispensable de connaître avec un maximum de précision les données hydrologiques utilisées. Les prévisions hydrologiques, la planification de la production hydro-électrique ainsi que les décisions concernant les risques d'inondation sont basées sur l'information contenue dans ces données.

L'apport non contrôlé constitue une variable de première importance pour l'opération d'un réservoir. Toutefois, cette variable clé est sensible aux diverses erreurs de mesures des composantes nécessaires à son calcul. En validant les apports non contrôlés, on donne donc aux spécialistes d'ALCAN une meilleure image des ressources hydriques disponibles.

La méthodologie développée dans ce sous-projet permet de corriger les apports non contrôlés journaliers à l'aide d'un filtre simple. Le paramètre du filtre a été fixé de façon à reproduire les variations observées aux rivières avoisinantes. De plus, le processus de filtrage a été appliqué de manière à conserver les variations de courtes périodes causées par les précipitations directes sur le réservoir. La méthode présentée dans ce rapport a été appliquée avec succès aux quatre sites d'ALCAN: lac St-Jean, Chute du Diable, Passes-Dangereuses et lac Manouane. Les résultats montrent clairement que les variations excessives et indésirables ont été grandement atténuées et que les valeurs négatives ont été éliminées dans la majorité des cas. Enfin, en favorisant un filtrage léger, particulièrement pour le printemps, l'abaissement des pointes de crue a été minimisé. Cette méthodologie conduit à une amélioration significative par rapport à l'approche initiale utilisée par ALCAN jusqu'à présent.

En terminant, nous recommandons à ALCAN de recalculer périodiquement en utilisant la méthodologie présentée dans cette étude, à mesure que de nouvelles données deviennent disponibles, le paramètre p optimal déduit des rivières avoisinantes.



8 BIBLIOGRAPHIE

- BLACKMAN R.B. et J.W TUKEY (1958). *The measurement of Power Spectra*, New York, Dover.
- BOUILLÉ M., FERNANDEZ R. et al. (1983). *Études préliminaires sur la problématique de la limnimétrie des grands réservoirs*, rapport CENTREAU no CRE-83-07.
- DUCHON, C.E. (1979). Lanczos Filtering in one and two dimensions, *Journal of Applied Meteorology*, 18, pp. 1016-1022.
- ESSENWANGER, O.M. (1985). *World Survey of Climatology Volume 1B General Climatology, 1B, Elements of Statistical Analysis*, Elsevier, Amsterdam, 424 pp.
- KAISER, J.F (1966). Digital Filters, *Systems analysis by digital computer*, Kuo, F.F et Kaiser, J.F (éditeurs), Wiley.
- NASH, J.E et J.V. SUTCLIFFE (1970). Riverflow forecasting through conceptual model, *Journal of hydrology*, 10, pp 282-290.
- PARZEN, E. (1960). *Mathematical considerations in the estimation of spectra*, Stanford University department Technical Report No. 3 (Contract DA-04-200-ORD-996).
- THOMPSTONE R.M et al. (1982). *Nouvelle technologie pour accroître la puissance générée par un système hydroélectrique complexe déjà existant*, Rapport technique final, ALCAN, Projet PAT no 46C/512-71.
- YEVJEVICH, V. (1972). *Stochastic processes in hydrology*, Water Resources Publications, 276 pp.

APPENDICE A

Biais entre la somme des ANC filtrés et la
somme des ANC non filtrés

Cet appendice a pour but de démontrer que la somme des ANC filtrés sur une certaine période de temps n'est pas égale à la somme des ANC non filtrés sur la même période de temps (éq. 4.7).

L'ANC filtré au jour t est défini par:

$$ANCF_t = \sum_{j=-p}^p w_j ANC_{t+j} \quad (A1)$$

D'où l'on déduit que la somme des $ANCF_t$ sur une période de n jours ($n > p$) est donnée par:

$$\sum_{t=1}^n ANCF_t = \sum_{t=1}^n \sum_{j=-p}^p w_j ANC_{t+j} = \sum_{j=-p}^p w_j \sum_{t=1}^n ANC_{t+j} = \sum_{j=-p}^p w_j \sum_{t=1+j}^{n+j} ANC_t \quad (A2)$$

Maintenant, introduisons la somme des ANC sur une période de n jours dans l'équation (A2):

$$\begin{aligned} \sum_{t=1}^n ANCF_t &= \sum_{j=-p}^{-1} w_j \left[\sum_{t=1}^n ANC_t + \sum_{t=1+j}^0 ANC_t - \sum_{t=n+j+1}^n ANC_t \right] \\ &\quad + w_0 \sum_{t=1}^n ANC_t + \sum_{j=1}^p w_j \left[\sum_{t=1}^n ANC_t + \sum_{t=n+1}^{n+j} ANC_t - \sum_{t=1}^j ANC_t \right] \\ &= \sum_{j=-p}^p w_j \sum_{t=1}^n ANC_t + \sum_{j=-p}^{-1} w_j \left[\sum_{t=1+j}^0 ANC_t - \sum_{t=n+j+1}^n ANC_t \right] \\ &\quad + \sum_{j=1}^p w_j \left[\sum_{t=n+1}^{n+j} ANC_t - \sum_{t=1}^j ANC_t \right] \end{aligned} \quad (A3)$$

En utilisant les deux propriétés des poids ($\sum w_j = 1$ et $w_j = w_j$), l'équation A4 devient:

$$\begin{aligned}
\sum_{t=1}^n ANCF_t &= \sum_{t=1}^n ANC_t + \sum_{j=1}^p w_j \left[\sum_{t=1-j}^0 ANC_t - \sum_{t=n-j+1}^n ANC_t + \sum_{t=n+1}^{n+j} ANC_t - \sum_{t=1}^j ANC_t \right] \\
&= \sum_{t=1}^n ANC_t + \sum_{j=1}^p w_j \sum_{t=1}^j [ANC_{t-j} - ANC_{n-j+t} + ANC_{n+t} - ANC_t] \quad (A5) \\
&= \sum_{t=1}^n ANC_t + \Delta
\end{aligned}$$

Nous pouvons donc conclure que la somme des ANC filtrés sur une période de n jours n'est pas égale à la somme des ANC non filtrés sur la même période.

APPENDICE B

Correction des ANC du lac St-Jean à l'aide
d'une régression multiple avec les
principaux tributaires

Cet appendice vise à établir une relation entre les débits des affluents du lac St-Jean et les apports non contrôlés au réservoir (ANC). C'est à partir de cette relation qu'est développée une méthode de correction des apports non contrôlés.

Les débits des affluents du lac St-Jean contribuent en grande partie à l'ANC. Puisque plus de 80% de la superficie du bassin de drainage du réservoir est jaugé, il est possible de déduire avec précision l'ANC. Deux options s'offrent à nous pour établir un lien simple entre les débits des rivières et l'ANC:

- une régression linéaire simple entre la somme des débits des rivières, SDR, et l'ANC (section 5);
- un modèle de régression linéaire multiple utilisant les débits de chacune des rivières en fonction de l'ANC.

Cette dernière option a été retenue afin de donner un poids plus grand à la rivière Petite Péribonka qui est représentative des basses terres non jaugées du lac St-Jean. Cependant, en raison de la forte corrélation entre les débits des rivières, il n'est pas possible de donner une interprétation physique aux paramètres du modèle (problème de multicollinéarité).

La régression est appliquée sur l'ANC moins la précipitation directe sur le réservoir (noté ANC*) afin de préserver les variations causées par la pluie. On exprime l'ANC* corrigé par le modèle comme suit:

$$ANCRC^* = b_0 + \sum_{i=1}^m b_i DR_i \quad (B1)$$

où $ANCRC^*$ est la correction des ANC* obtenue par régression;

DR_i est le débit de la i ème rivière;

m est le nombre de rivières disponibles pour la régression;

b_0, b_1, \dots, b_m sont les estimations des paramètres $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m$ obtenues par la

régression multiple (méthode des moindres carrés) effectuée sur les données historiques à partir du modèle théorique suivant:

$$ANC^* = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i DR_i + \epsilon \quad (B2)$$

où ϵ est un terme d'erreur aléatoire. L'ANC corrigé est obtenu en additionnant la précipitation à la quantité ANCR*.

La méthode a été appliquée pour les données du lac St-Jean (1962-1992). Les paramètres sont estimés à chaque saisons à chaque année. Les saisons considérées sont les mêmes que celles définies à la section 2. Les rivières utilisées pour la régression sont données au tableau B1 de l'annexe B. La figure B.1 montre un exemple de l'ANC corrigé par la méthode de régression multiple.

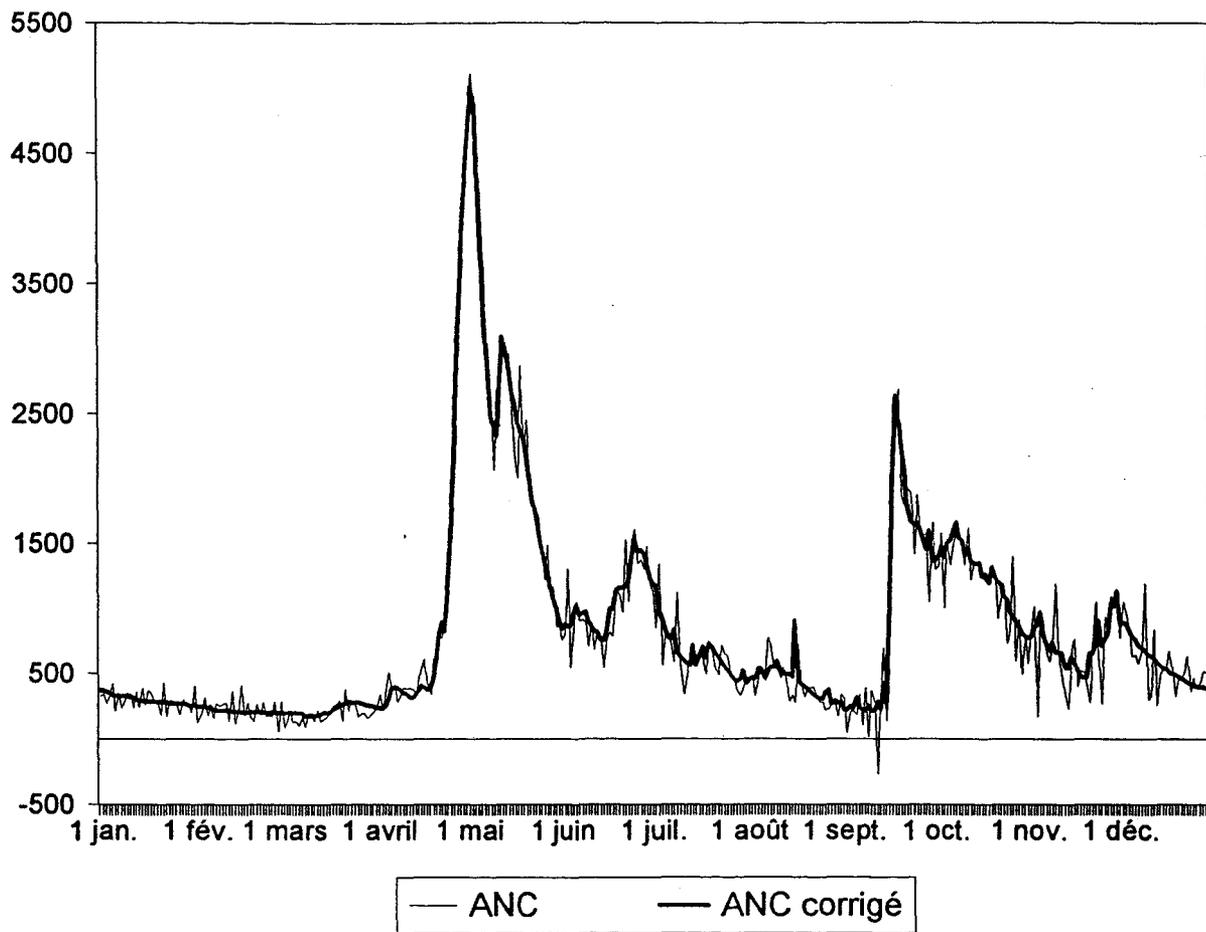
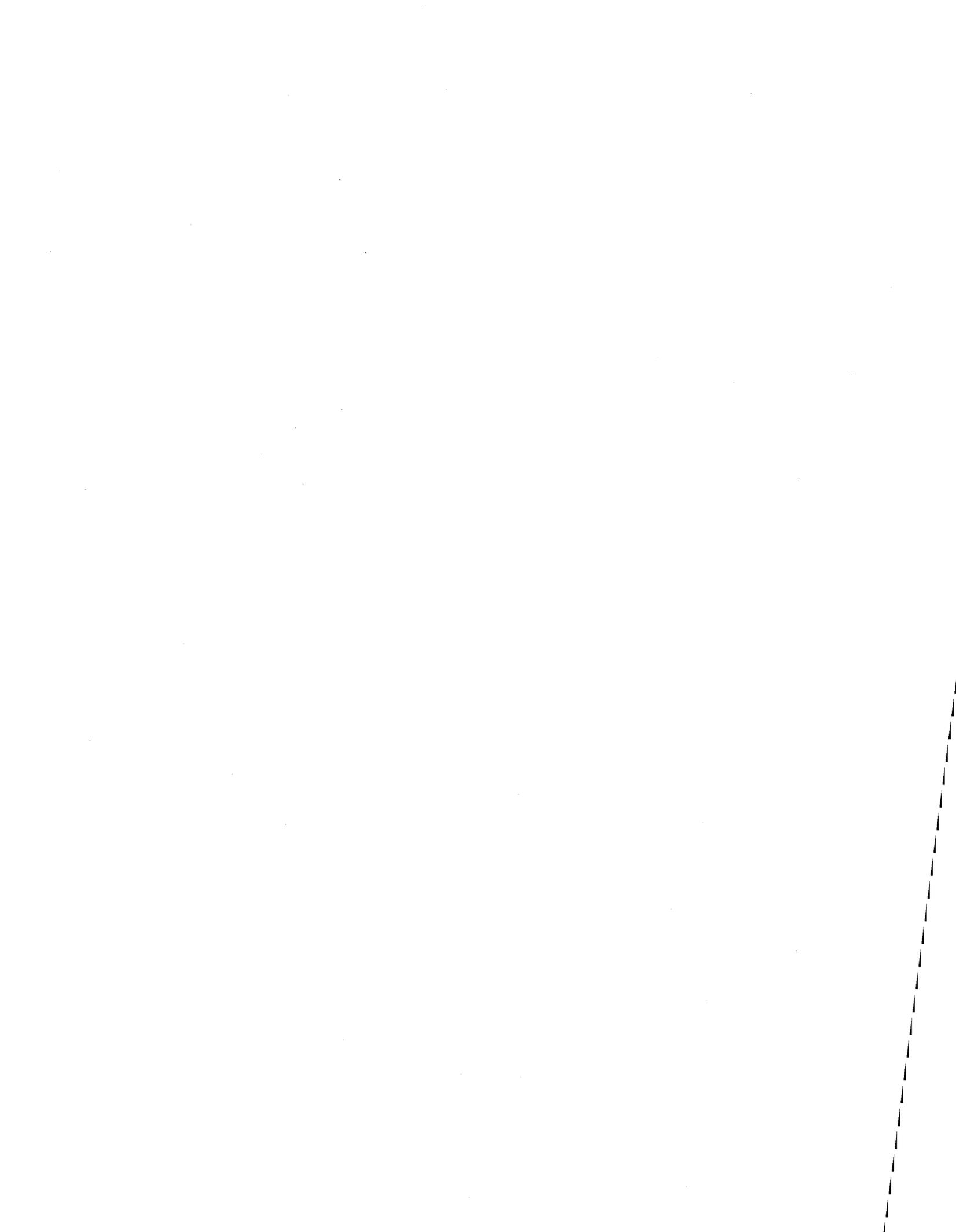


Figure B.1 ANC corrigé par régression multiple avec les débits des rivières avoisinantes



APPENDICE C

Algorithme de filtrage des ANC

L'objectif de cet appendice est de présenter un algorithme général de filtrage des apports non contrôlés.

ENTRÉES

- apports non contrôlés *ANC*;
- dates des observations *DATE* et date de la fin du fichier *DATEFIN*;
- débit provoqué par la pluie directe sur le bassin *DPL*;
- dates limites des saisons *HP** (hiver-printemps), *PE* (printemps-été), *EA* (été-automne), *AH* (automne-hiver);
- paramètres du filtre pour chacune des saisons *PH* (hiver), *PP* (printemps), *PE* (été), *PA* (automne).

SORTIES - apports non contrôlés corrigés

(Calcul des apports non contrôlés corrigés jusqu'à la fin du fichier)

Tant que $DATE \leq DATEFIN$ fait

(Détermination de la saison et du paramètre p)

Si $AH < DATE \leq HP^*$ alors

Mettre $p = PH$ (hiver)

Sinon si $HP^* < DATE \leq PE$ alors

Mettre $p = PP$ (printemps)

Sinon si $PE < DATE \leq EA$ alors

Mettre $p = PE$ (été)

Sinon si $EA < DATE \leq AH$ alors

Mettre $p = PA$ (automne)

Fin si

(Calcul de l'apport non contrôlé corrigé *ANCC* pour le jour *DATE*)

Initialise $i = -p$

Initialise $ANCC[DATE] = 0$

Tant que $i \leq p$ fait

(Calcul des poids du filtre)

Mettre $w[i] = (1 + \cos(\pi i / p)) / (2 p)$

(filtrage de l'apport non contrôlé moins le débit de la précipitation)

Mettre $ANCC[DATE] = ANCC[DATE] + (ANC[DATE+i] - DPL[DATE])$

$w[i]$

fin fait

(Ajout du débit de la précipitation à la valeur filtrée)

Mettre $ANCC[DATE] = ANCC[DATE] + DPL[DATE]$

OUTPUT $ANCC[DATE]$

Mettre $DATE = DATE + 1$

fin fait

* le paramètre HP peut être fixe ou variable selon l'année (début de la crue)

ANNEXE A

Liste des valeurs singulières extrêmes
détectées et corrigées

Cette annexe contient la liste des valeurs singulières extrêmes détectées en appliquant le test présenté à la section 3. Les valeurs corrigées sont indiquées par un astérisque.

Tableau A1 Valeurs singulières extrêmes détectées et corrigées (LSJ et CD)

Lac St-Jean			Chute du Diable		
Date (aaaammjj)	ANC (m ³ /s)	ANC' (m ³ /s)	Date (aaaammjj)	ANC (m ³ /s)	ANC' (m ³ /s)
19580209	688	219.5	19541121	535	378.0
19580702	2325	1654.0	19551215	249	51.0
19600107	-119	435.0	19551216	-74	154.5
19640824	1948	974.5	19581031*	0	219.5
19680128	756	-42.5	19610310*	-198	-28.5
19690516	1759	2908.5	19610327*	232	38.0
19700504	5828	4725.0	19640721	91	470.0
19710309*	1051	24.0	19670130	-91	136.0
19710823*	2192	222.5	19690527*	65	671.5
19711211	949	136.0	19710824	190	337.0
19711216	954	92.5	19711017*	161	415.0
19721201*	1719	-403.5	19720707	354	191.0
19721202*	-994	1024.0	19730714	765	609.0
19731206	1090	187.0	19760514	1861	1559.0
19741203	1011	276.5	19790728	634	467.5
19760829	1291	375.5	19860407	248	147.0
19761015	371	1607.0	19870122*	142	-7.0
19770421	1059	1862.0	19870123*	-52	102.0
19770422	2829	1998.0	19910416	243	145.0
19771201	65	680.0			
19771202	813	235.0			
19801217	-487	455.5			
19811001*	-838	412.5			
19871202	1092	443.0			
19871203	101	809.5			
19901210	1196	487.0			

* Valeurs singulières extrêmes corrigées

Tableau A2 Valeurs singulières extrêmes détectées et corrigées (LM et PD)

Lac Manouane			Passes-Dangereuses		
Date (aaaammjj)	ANC (m ³ /s)	ANC' (m ³ /s)	Date (aaaammjj)	ANC (m ³ /s)	ANC' (m ³ /s)
19431027	527	347.0	19431213	17	-212.5
19440131*	-241	-18.0	19431214	-159	96.5
19440502*	397	44.0	19441107*	802	298.5
19441106*	493	132.0	19441113*	-161	335.5
19450320	0	75.0	19450130	37	238.0
19450321	127	31.0	19451004	62	281.5
19450817	354	201.5	19460826	453	238.0
19461206*	-201	-11.5	19470223	-17	134.5
19461208*	283	99.0	19480212*	-241	-18.5
19471022	343	139.0	19480801	241	464.5
19480422	88	45.5	19490222*	-74	49.5
19480423	26	66.5	19490906	838	379.5
19481202	178	72.5	19500223	238	52.5
19491123*	-218	17.0	19500909	371	41.0
19491129*	-150	74.0	19510618	34	238.0
19500118	173	38.5	19520304	399	37.0
19510927	-11	218.0	19520322	-113	253.0
19510928	300	74.0	19520323	583	25.5
19520108	210	11.0	19520511	504	889.0
19520109	-26	171.5	19550328	263	94.5
19521021*	-150	92.5	19560331*	-221	45.5
19521223*	-283	56.5	19560417*	391	211.0
19521226*	-113	95.0	19570215	-184	171.0
19540101*	272	78.0	19571028	459	43.5
19541229*	-139	39.5	19620225	-102	89.0
19541230	88	-95.0	19620915	178	619.0
19560102	127	28.0	19620916	779	313.0
19560810	331	137.5	19631208	-85	68.0
19561220	40	209.5	19670923	9	350.0
19561221	306	117.5	19671215	-77	178.5
19570103*	269	99.5	19681204	317	126.0
19571208	190	47.0	19700502	481	300.5
19581221	-60	109.0	19710823	609	168.5
19590818	306	110.5	19720517	278	555.0

* Valeurs singulières extrêmes corrigées

Tableau A2 Valeurs singulières extrêmes détectées et corrigées (LM et PD)

Lac Manouane			Passes-Dangereuses		
Date (aaaammjj)	ANC (m ³ /s)	ANC' (m ³ /s)	Date (aaaammjj)	ANC (m ³ /s)	ANC' (m ³ /s)
19600109	-102	48.0	19720518	1022	477.5
19610302	127	-52.5	19720612	-227	300.0
19610411	125	-30.0	19730330	300	96.5
19620306	136	23.0	19730607	943	731.0
19630422	147	21.5	19731205	399	109.0
19631214	-82	160.0	19740712	1102	68.0
19631215	235	1.5	19750317	371	69.5
19641208	-26	84.0	19750717*	-343	222.5
19641209	94	-6.0	19760219	314	24.0
19650624	-122	303.0	19760220	-88	194.0
19651104*	-312	299.0	19760322	-139	207.0
19651105	414	-156.0	19780922	-303	136.0
19651207	-133	65.5	19790123*	-187	25.5
19670123	167	41.0	19800512	550	1102.5
19670124*	-9	164.0	19800917	627	-24.0
19670125	161	38.0	19810408	-112	247.5
19671230	161	14.5	19810409	400	42.0
19671231	-45	109.0	19820507	197	668.5
19700208*	-6	108.0	19820508*	1102	214.5
19700831*	-164	238.0	19820509	232	919.5
19701018*	-181	157.5	19881106*	884	229.0
19701210	173	31.5	19881203	323	76.0
19711105	351	44.0	19881208	-21	232.0
19711216	235	61.0	19910817*	-198	197.0
19711219	193	41.0	19920313	-81	192.0
19721211	-28	102.0	19930319*	519	97.0
19731206	238	40.0			
19731207	-62	170.0			
19740114	173	-7.0			
19740115*	-96	109.0			
19740816	306	28.5			
19750514	-303	347.0			
19750515	-224	347.0			
19751111	-156	392.0			
19760405	286	149.0			
19771216	-60	82.5			

* Valeurs singulières extrêmes corrigées

Tableau A2 Valeurs singulières extrêmes détectées et corrigées (LM et PD)

Lac Manouane		
Date (aaaammjj)	ANC (m ³ /s)	ANC' (m ³ /s)
19771219	-26	108.0
19820901*	778	56.0
19860618	592	133.5
19880624	504	128.5
19900427	283	61.0
19930108*	-283	259.0
19930127*	1001	291.0
19930831*	-267	9.0

* Valeurs singulières extrêmes corrigées

ANNEXE B

Tableaux de la section 5

Tableau B1 Rivières utilisées pour calculer SDR

Année	Hiver	Printemps	Été	Automne
1962	-	-	-	A
1963	A	A	A	A
1964	A	A	A	A
1965	A	A	B	B
1966	A	A	B	A
1967	A	A	B	B
1968	A	A	B	B
1969	A	A	B	B
1970	A	A	B	B
1971	A	A	B	B
1972	A	A	A	A
1973	A	A	A	A
1974	A	A	A	A
1975	C	C	A	A
1976	C	C	C	C
1977	C	C	D	D
1978	D	D	D	D
1979	D	D	D	D
1980	D	D	D	D
1981	D	D	D	D
1982	D	D	D	D
1983	D	D	D	D
1984	D	D	D	D
1985	D	D	D	D
1986	D	D	D	D
1987	D	D	D	D
1988	D	D	D	D
1989	D	D	D	D
1990	D	D	D	D
1991	D	D	D	D
1992	D	D	D	-

A: ASH, MISBI et MISNI (75% de la superficie totale du bassin)

B: ASH, MISBI, MISNI et MET (80% de la superficie totale du bassin)

C: ASH, MISBI, MISNI et PP (77.3% de la superficie totale du bassin)

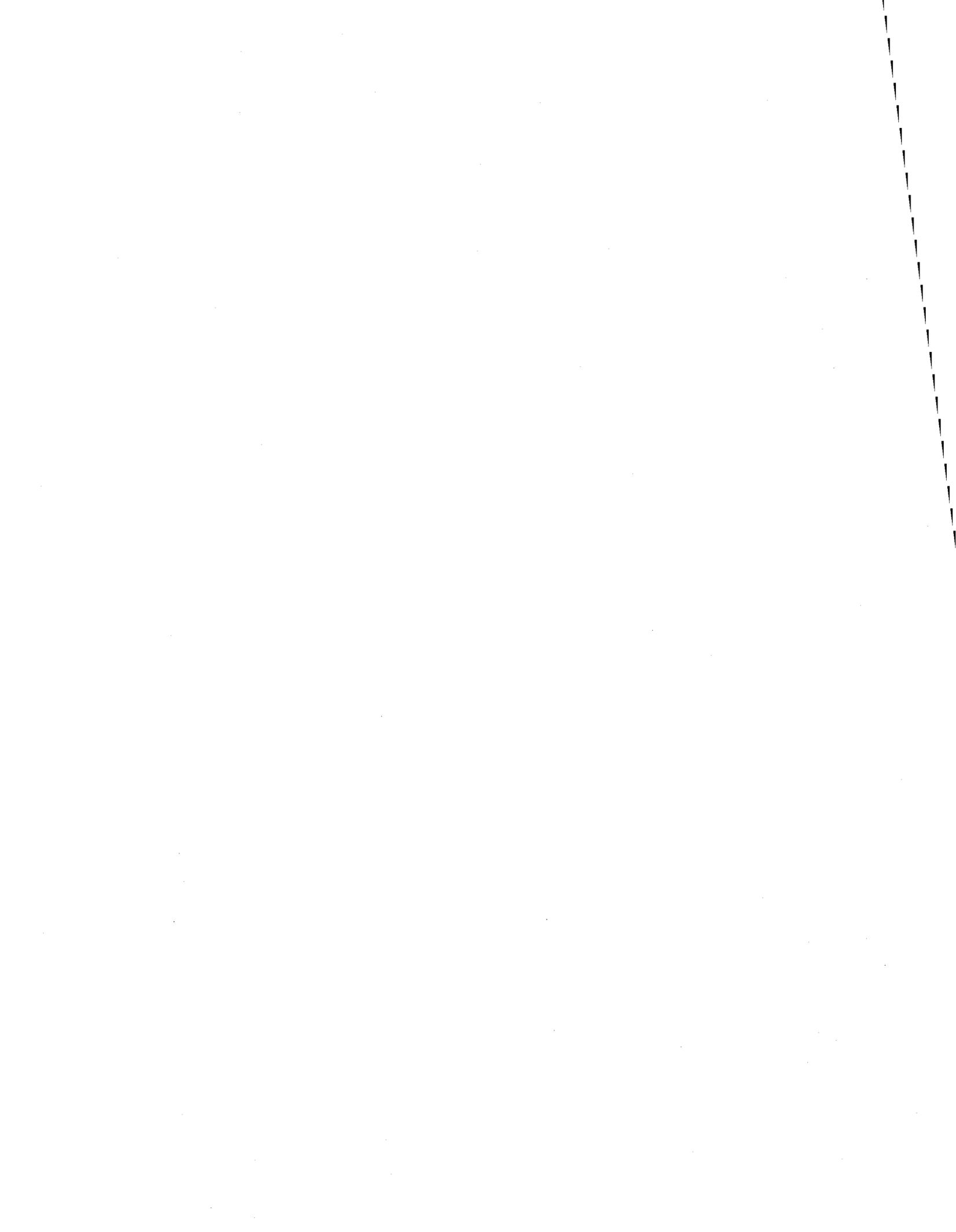
D: ASH, MISBI, MISNI, MET et PP (82.3% de la superficie totale du bassin)

Tableau B2 $p1_{opt}$ et $p2_{opt}$ pour le réservoir lac St-Jean

Année	Écart absolu moyen				Coefficient de Nash			
	Hiver	Print.	Été	Aut.	Hiver	Print.	Été	Aut.
1962	-	-	-	7	-	-	-	6
1963	7	6	3	4	7	5	3	4
1964	15	7	4	7	15	5	4	9
1965	6	4	5	4	9	4	4	4
1966	15	4	3	3	15	4	3	3
1967	10	10	3	3	8	9	3	3
1968	7	3	3	5	7	3	4	5
1969	10	4	4	4	6	5	4	4
1970	8	3	3	5	4	2	3	4
1971	15	3	6	5	15	4	5	5
1972	15	4	6	6	15	4	5	5
1973	15	3	4	7	14	2	4	7
1974	7	4	5	5	7	5	5	5
1975	7	8	4	4	7	5	4	5
1976	6	3	4	6	4	3	4	6
1977	5	2	5	6	3	8	5	6
1978	5	3	3	4	5	3	2	4
1979	8	2	4	5	8	2	4	5
1980	8	4	3	5	4	4	3	5
1981	4	3	5	5	4	3	4	6
1982	7	3	4	5	4	3	5	5
1983	11	3	6	6	7	3	6	5
1984	6	3	5	7	5	3	4	6
1985	5	3	3	6	3	3	3	6
1986	15	3	6	4	15	3	6	4
1987	5	4	5	6	3	3	5	6
1988	7	2	5	6	5	3	5	5
1989	5	3	5	4	5	2	5	3
1990	6	3	6	3	4	2	6	3
1991	9	3	7	4	7	3	7	5
1992	7	2	5	-	4	2	4	-
Moy.	-	3.7	4.5	5.0	-	3.7	4.3	5.0
Mode	-	3.0	5.0	5.0	-	3.0	4.0	5.0
Méd.	-	3.0	4.5	5.0	-	3.0	4.0	5.0

Tableau B3 $p1_{opt}$ et $p2_{opt}$ pour le site Chute du Diable

Année	Écart absolu moyen				Coefficient de Nash			
	Hiver	Print.	Été	Aut.	Hiver	Print.	Été	Aut.
1979	-	-	-	5	-	-	-	4
1980	13	2	2	2	11	2	4	2
1981	5	4	3	3	6	3	3	3
1982	15	6	2	2	15	2	2	2
1983	6	3	3	4	5	2	3	4
1984	15	3	11	4	15	3	13	5
1985	5	2	3	3	5	2	4	3
1986	14	2	3	2	9	2	3	2
1987	7	2	3	6	4	2	3	7
1988	14	2	2	4	14	2	2	5
1989	15	2	15	2	15	2	15	2
1990	14	2	2	2	12	2	2	2
1991	7	3	2	4	6	2	3	4
1992	15	2	3	-	15	2	3	-
Moy.	-	2.7	4.2	3.3	-	2.2	4.6	3.5
Mode	-	2.0	3.0	2.0	-	2.0	3.0	2.0
Méd.	-	2.0	3.0	3.0	-	2.0	3.0	3.0



ANNEXE C

**Graphiques des ANC corrigés pour trois
années témoins**

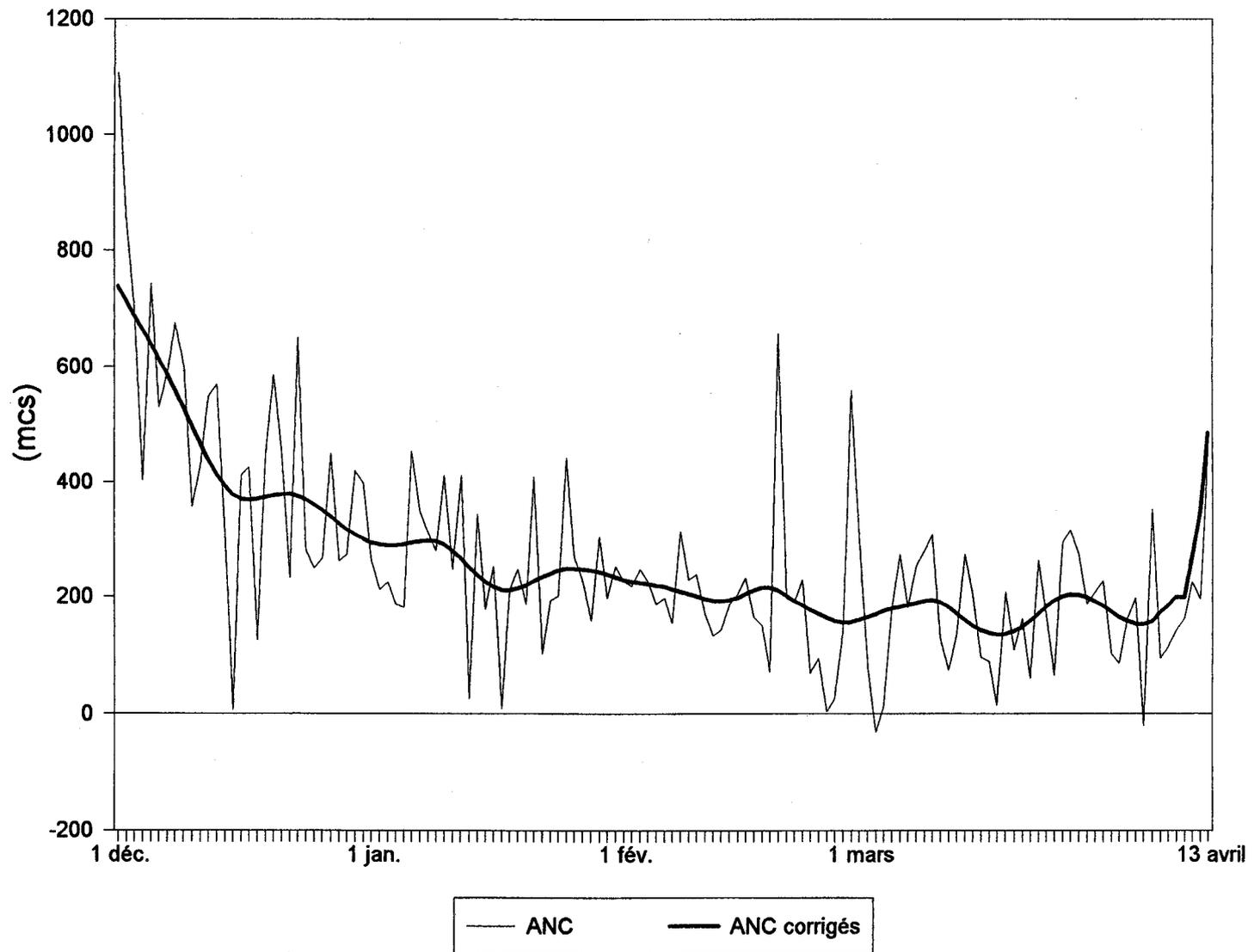


Figure C.1 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac St-Jean (hiver 1963-1964, saison moyenne)

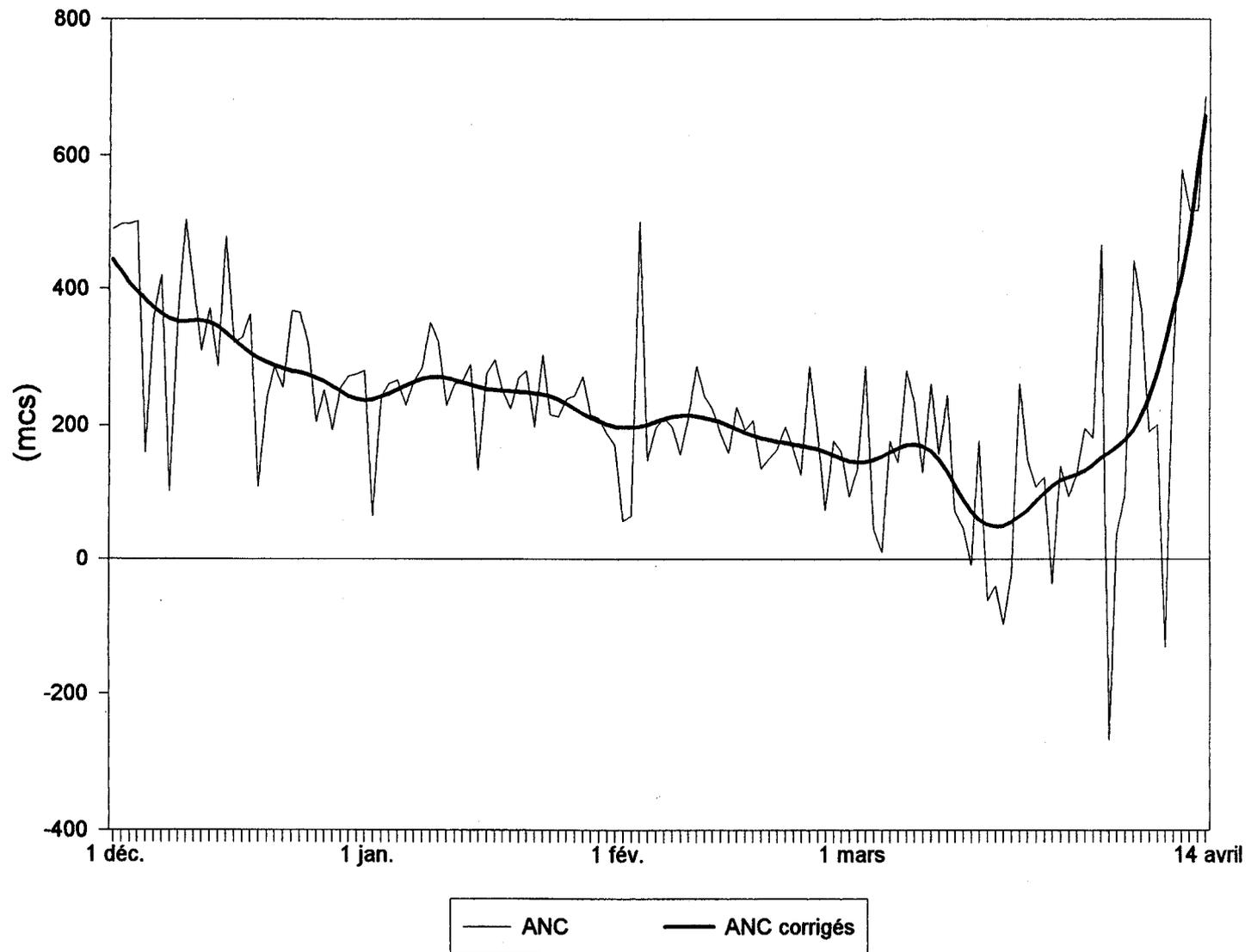


Figure C.2 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac St-Jean (hiver 1955-1956, saison sèche)

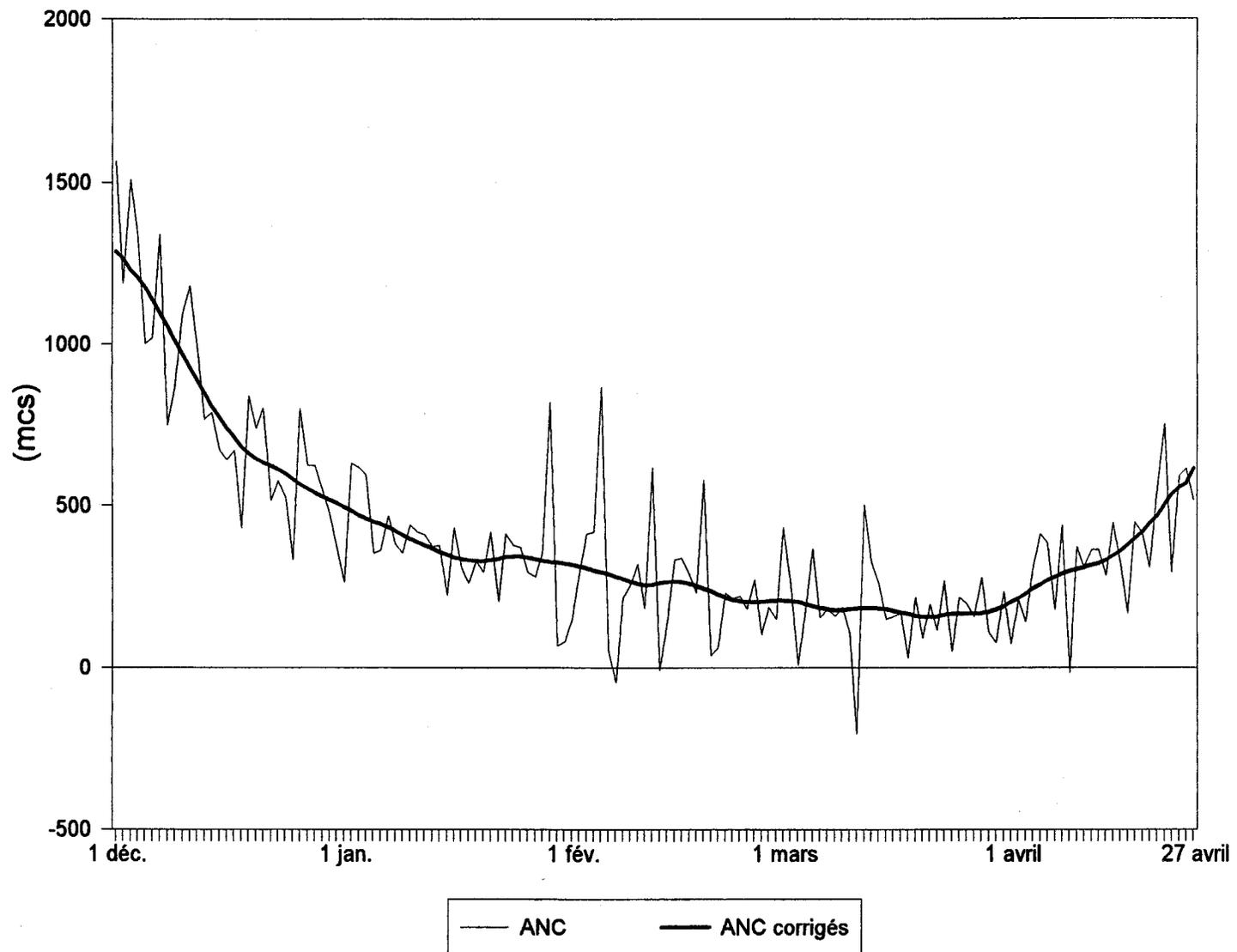


Figure C.3 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac St-Jean (hiver 1966-1967, saison humide)

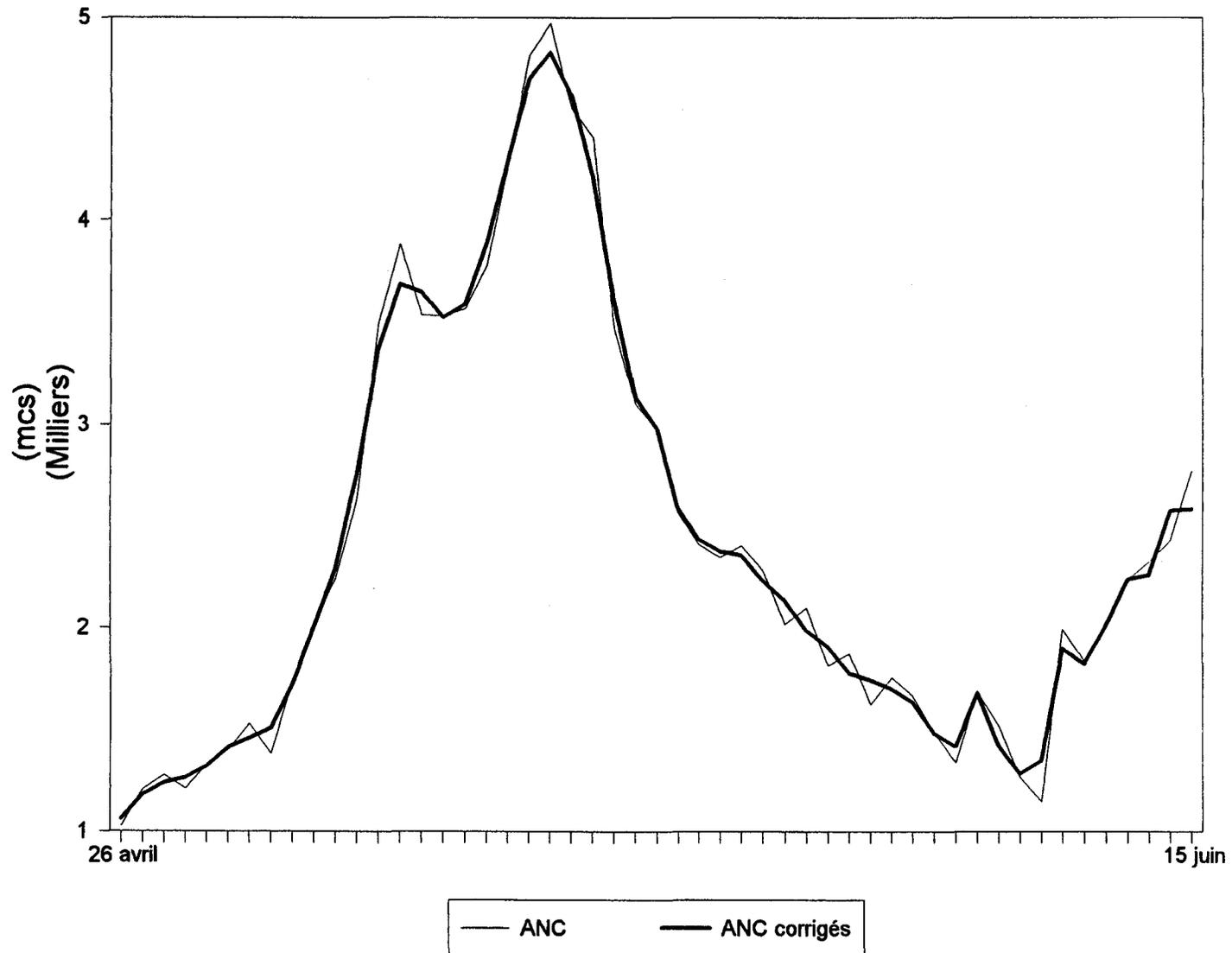


Figure C.4 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac St-Jean (printemps 1959, saison moyenne)

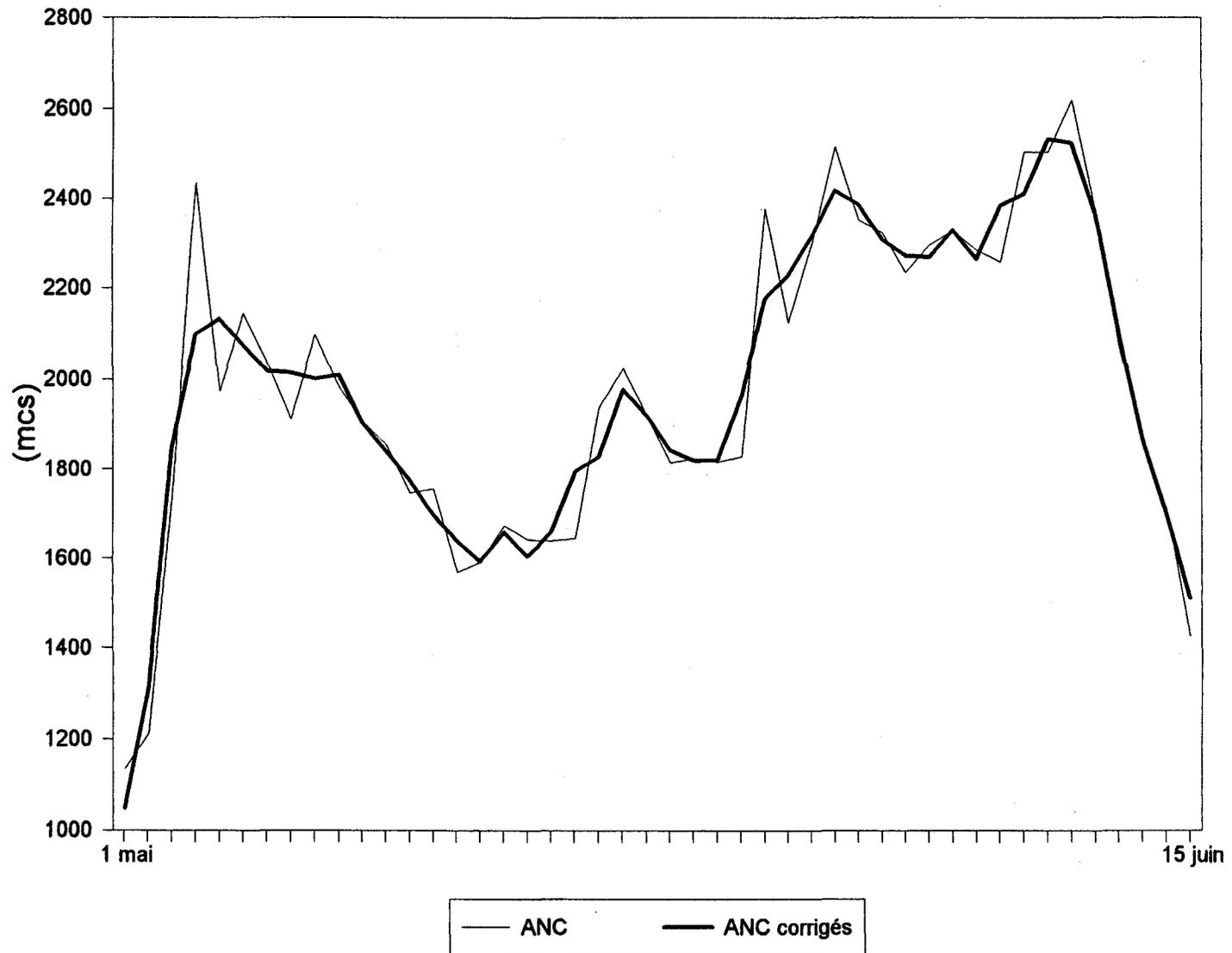


Figure C.5 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac St-Jean (printemps 1967, saison sèche)

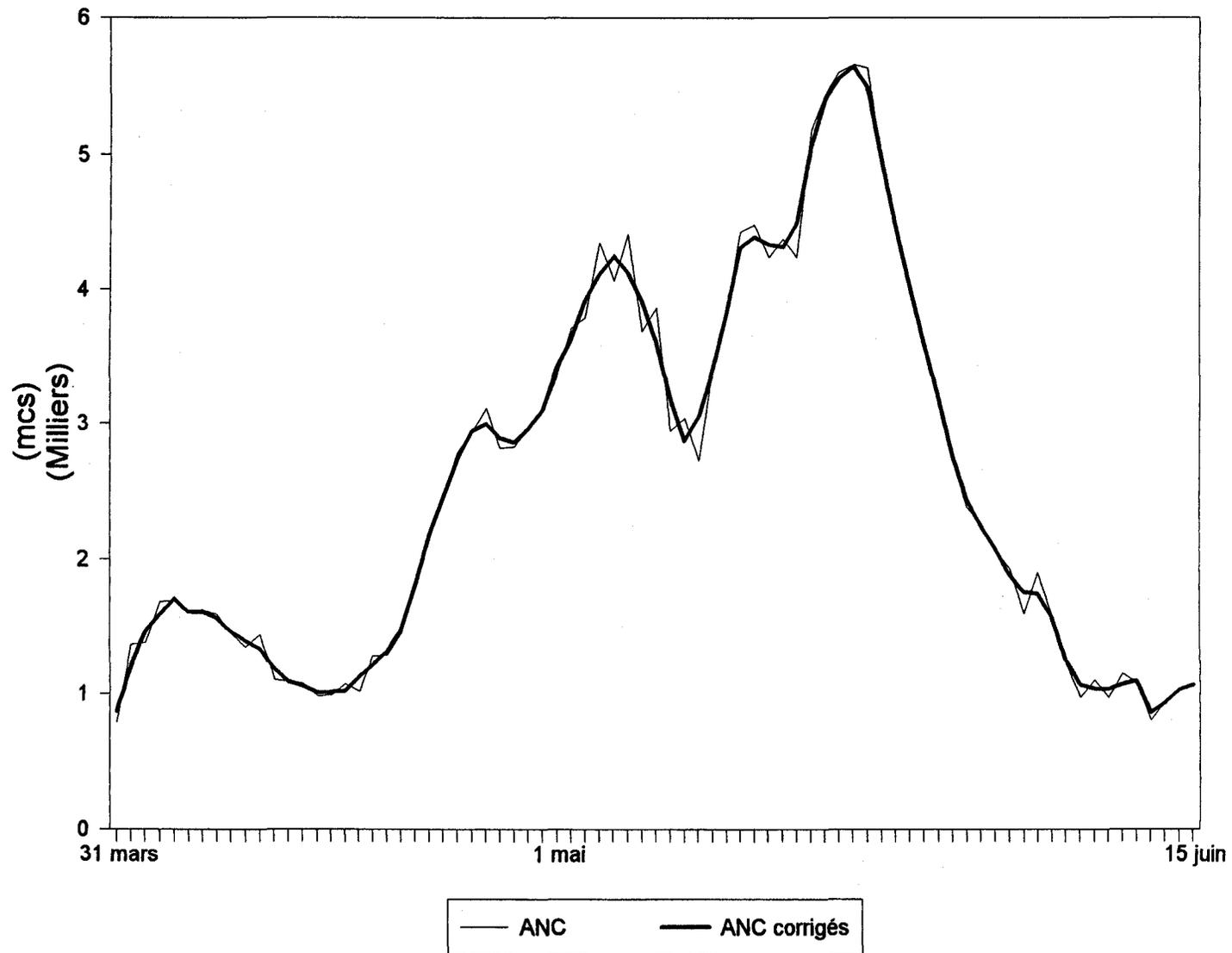


Figure C.6 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac St-Jean (printemps 1976, saison humide)

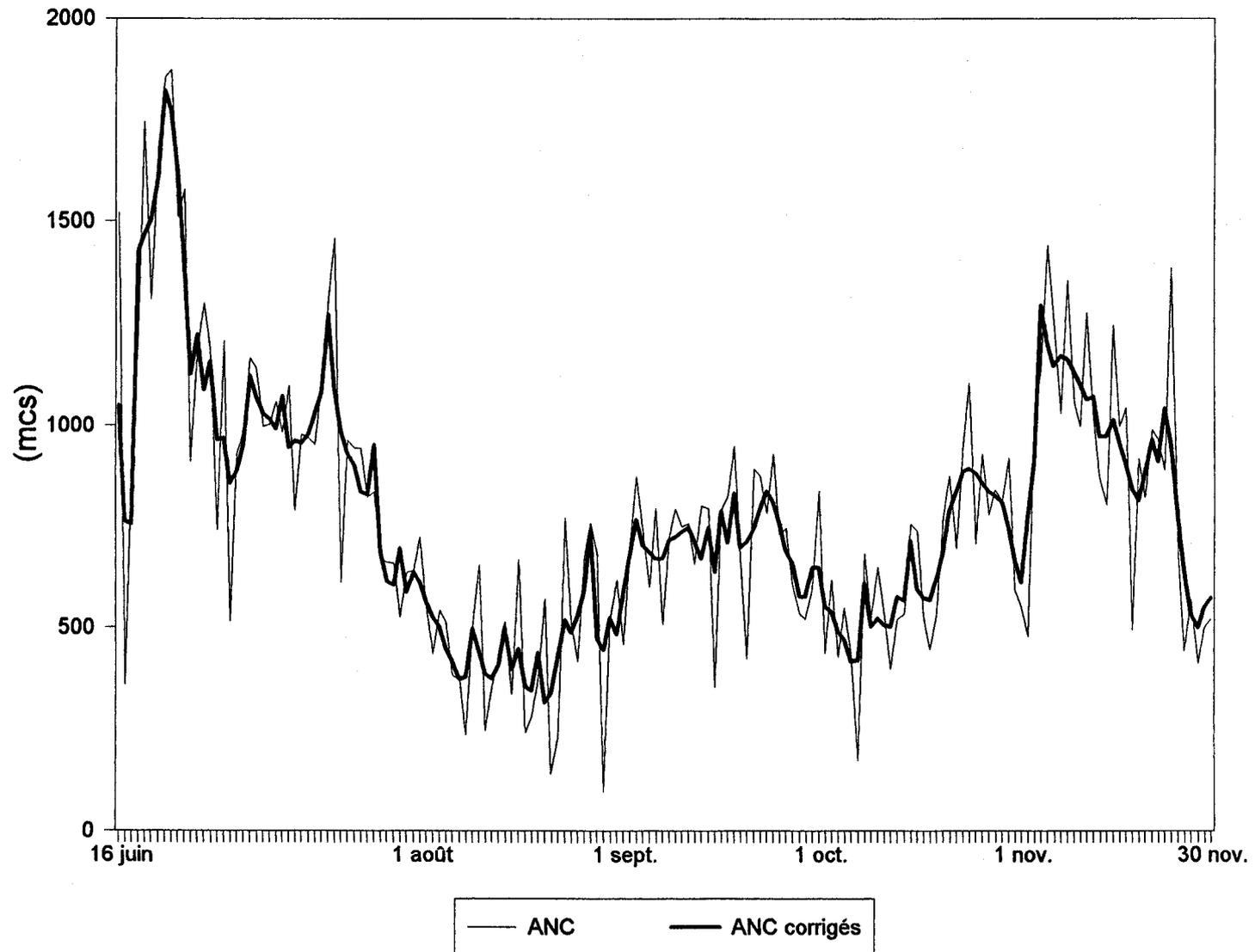


Figure C.7 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac St-Jean (été-automne 1982, saison moyenne)

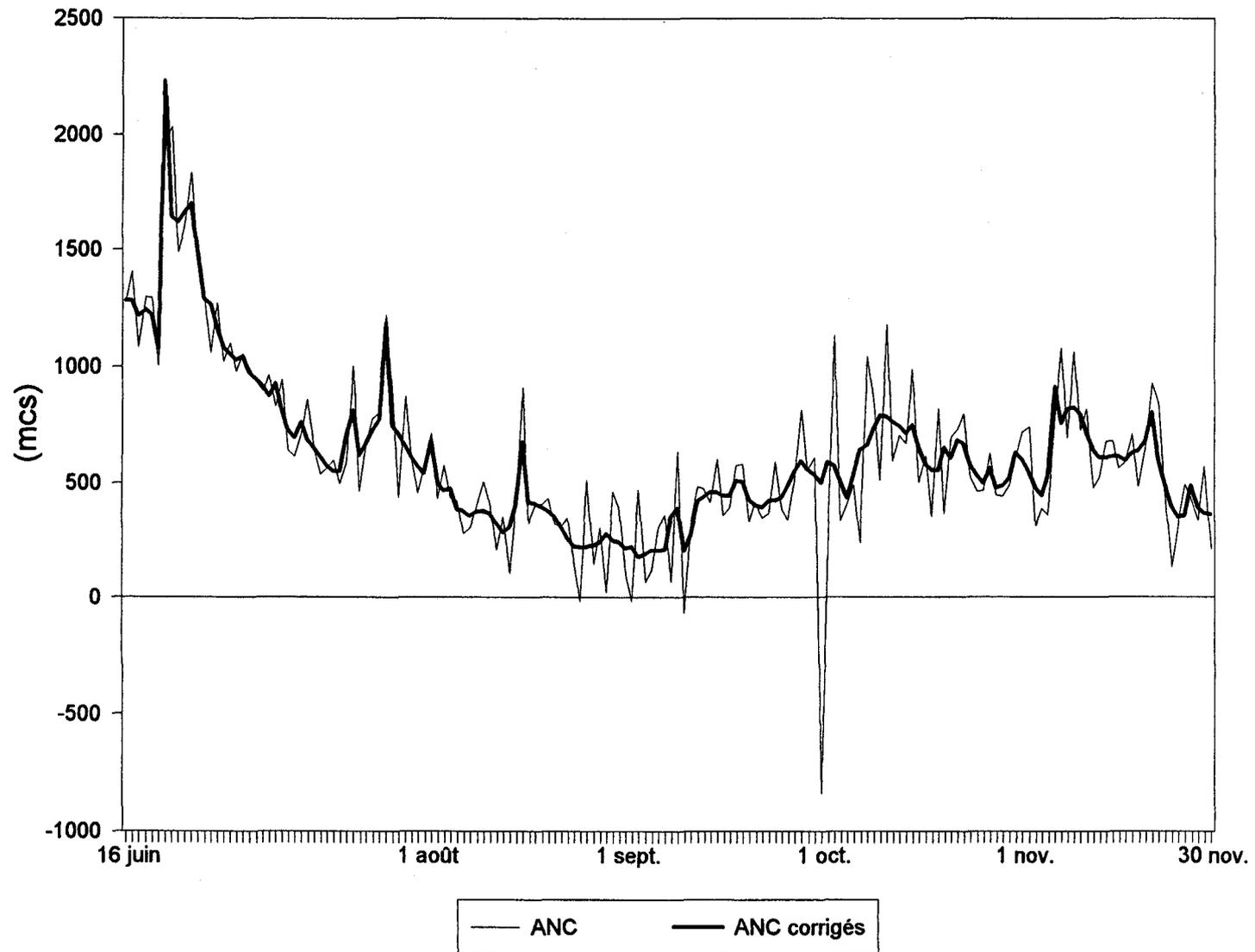


Figure C.8 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac St-Jean (été-automne 1981, saison sèche)

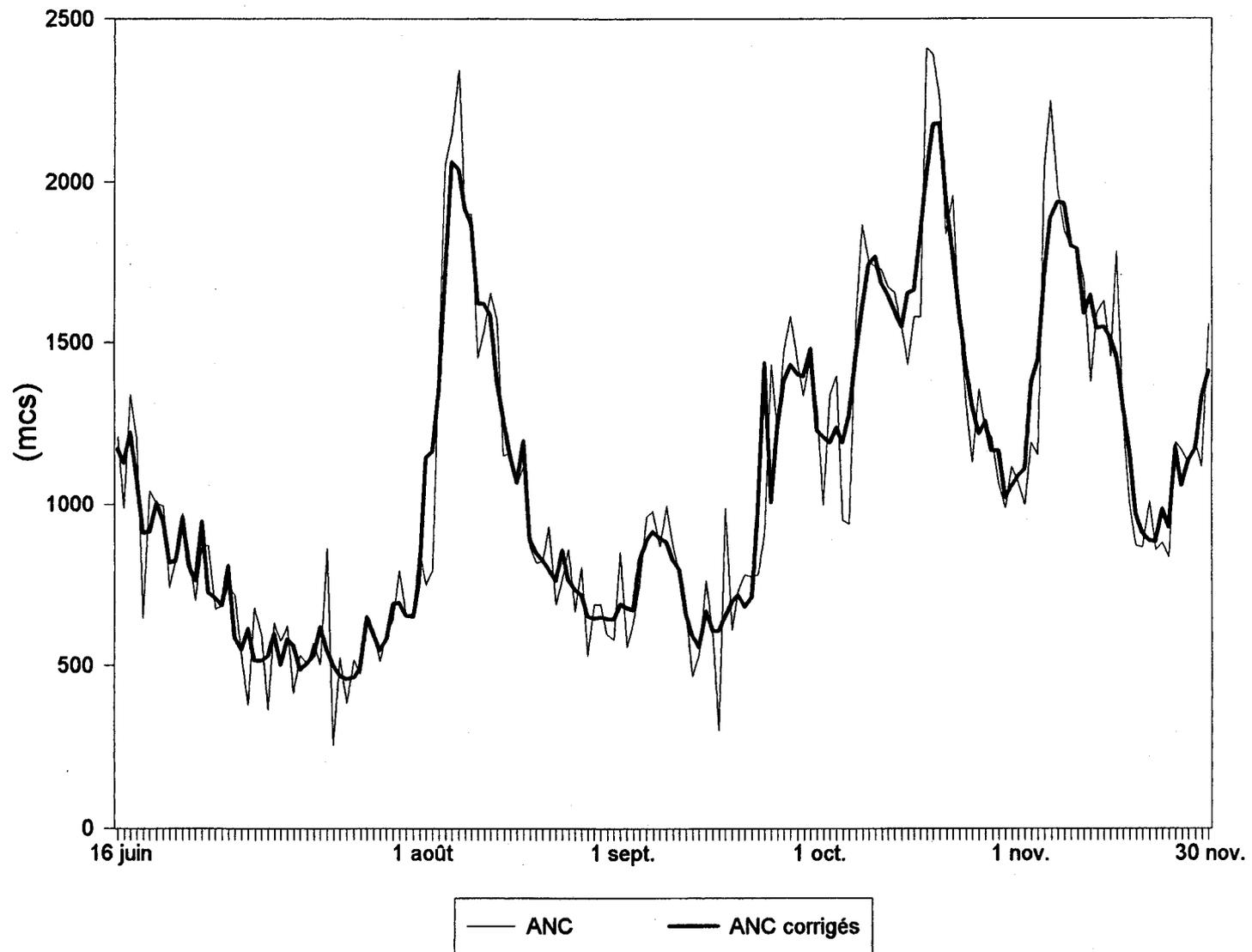


Figure C.9 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac St-Jean (été-automne 1966, saison humide)

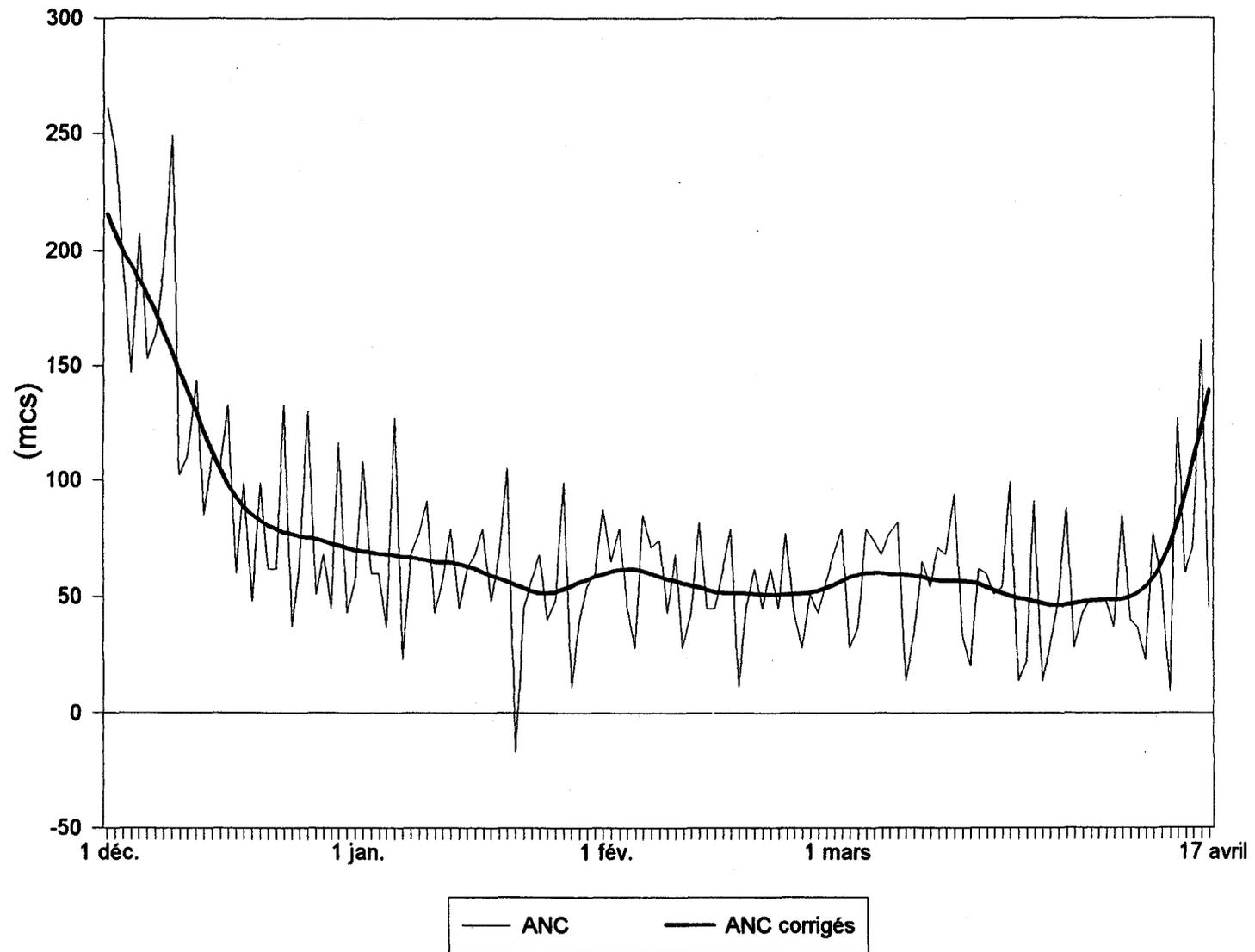


Figure C.10 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Chute du Diable (hiver 1963-1964, saison moyenne)

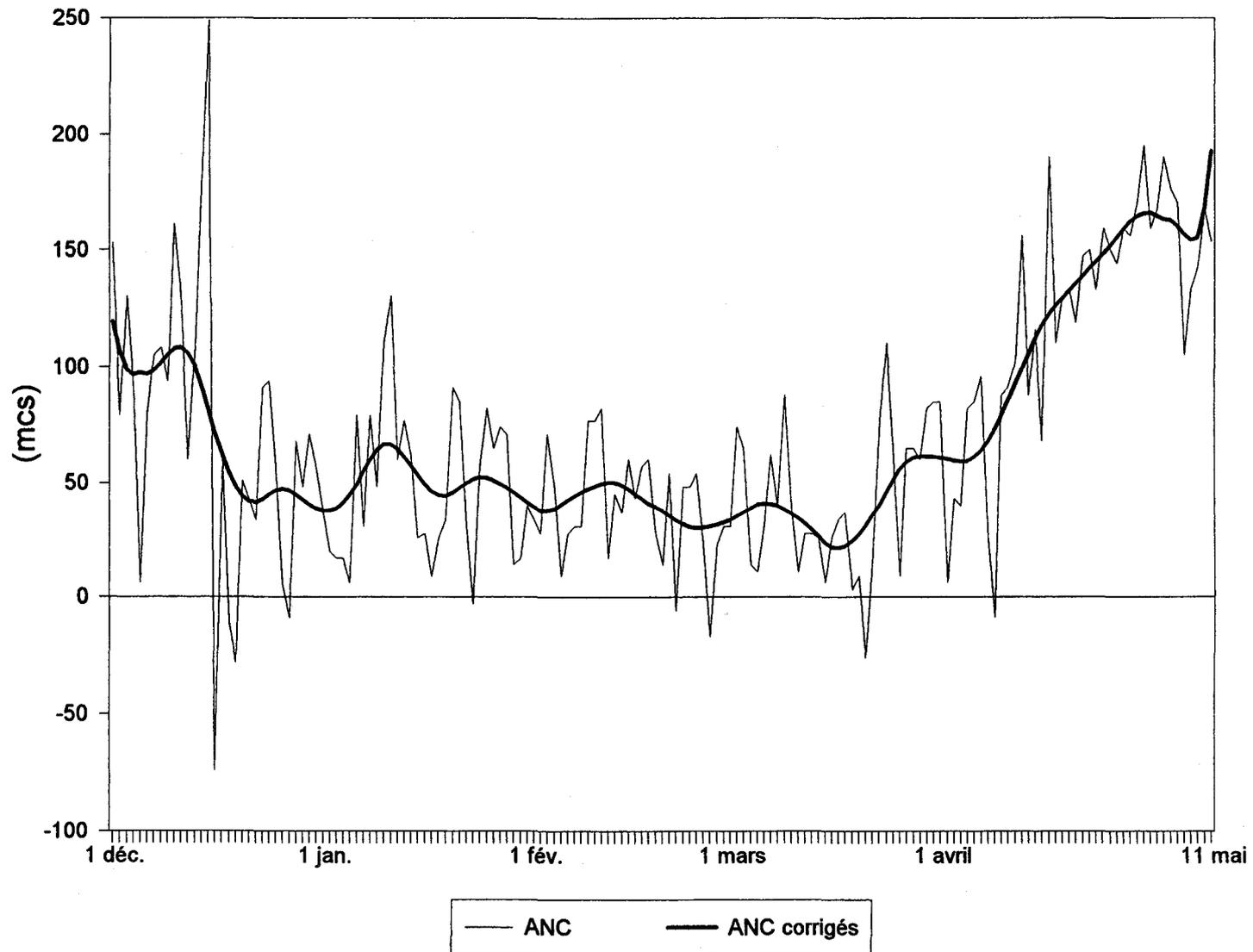


Figure C.11 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Chute du Diable (hiver 1955-1956, saison sèche)

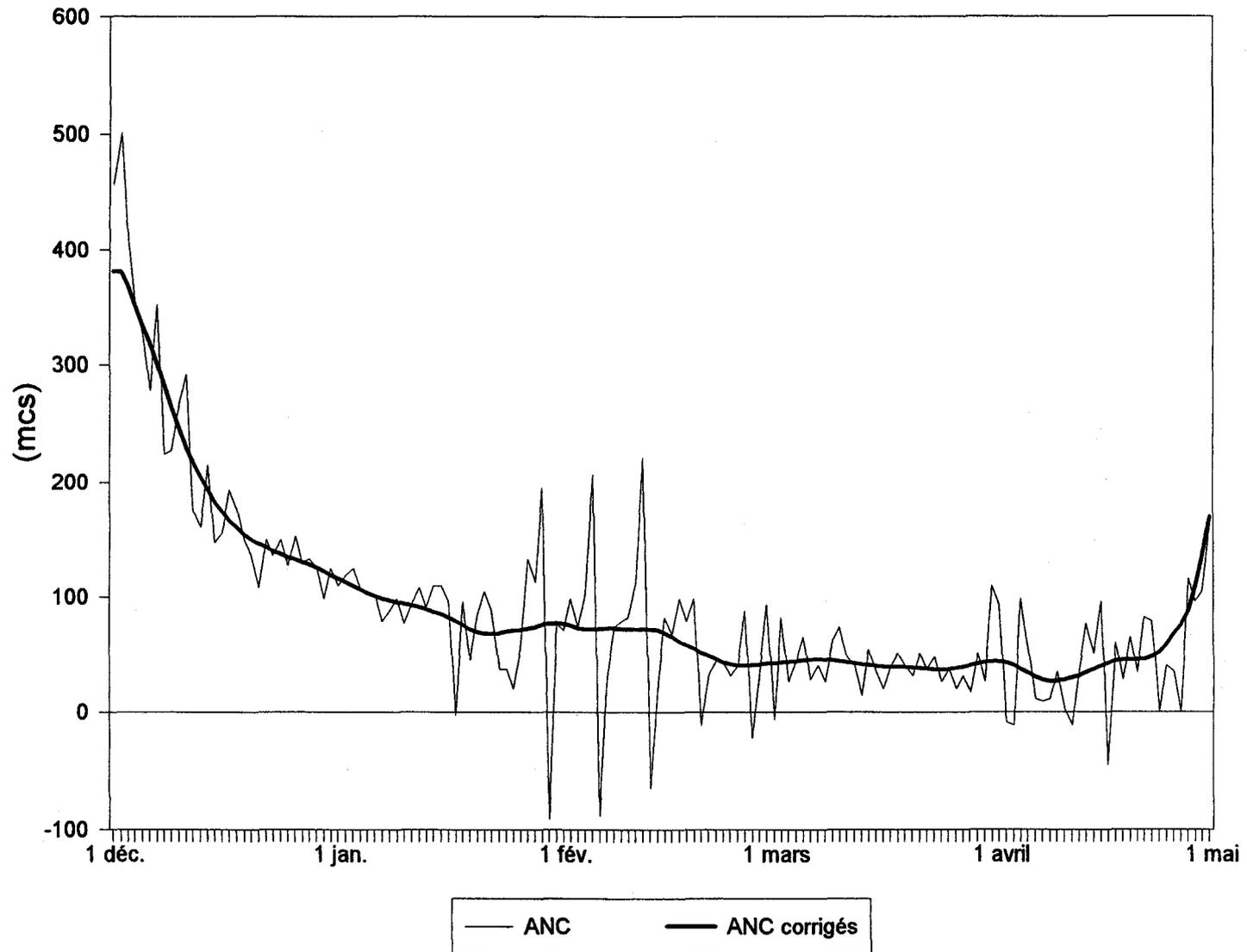


Figure C.12 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Chute du Diable (hiver 1966-1967, saison humide)

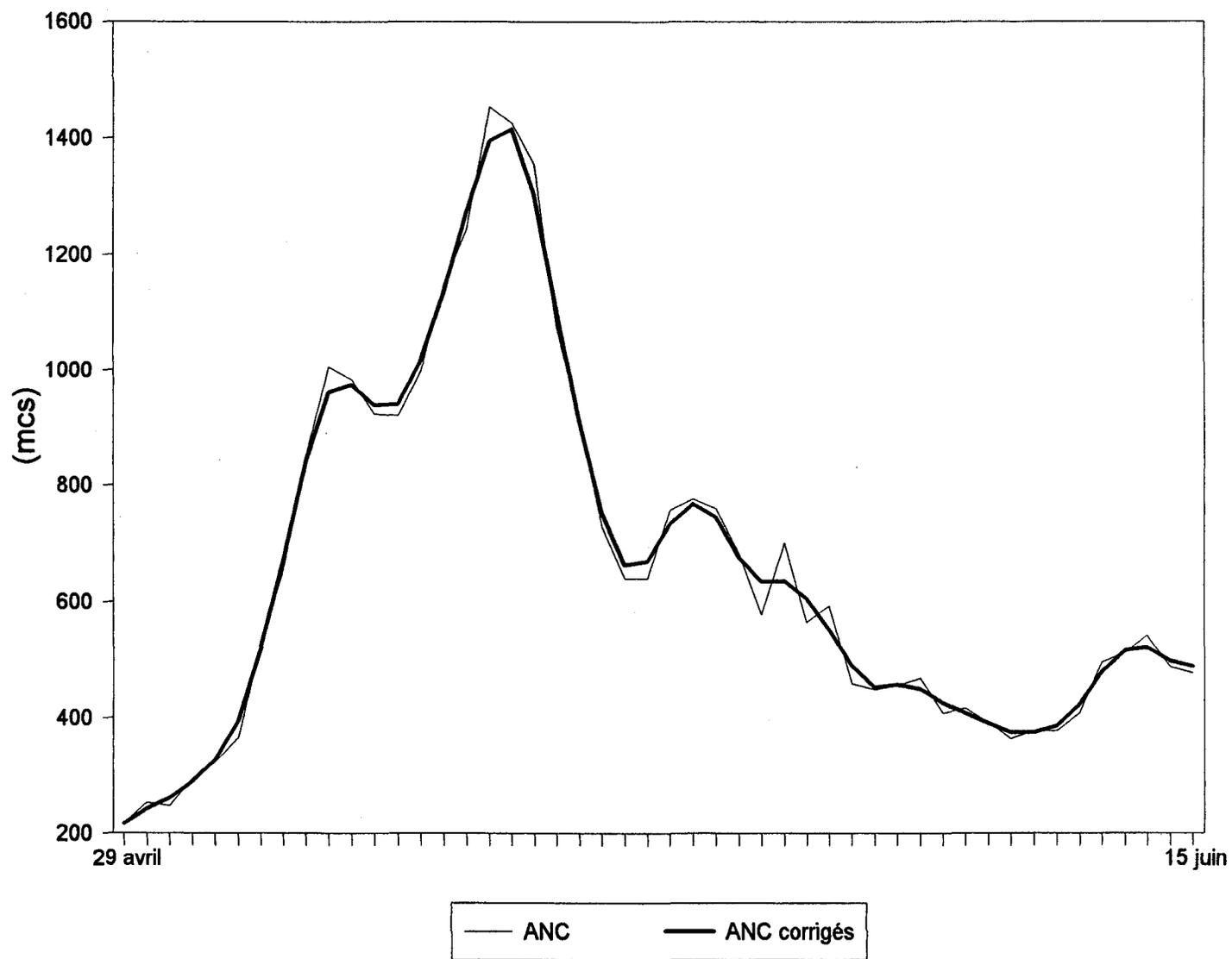


Figure C.13 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Chute du Diable (printemps 1959, saison moyenne)

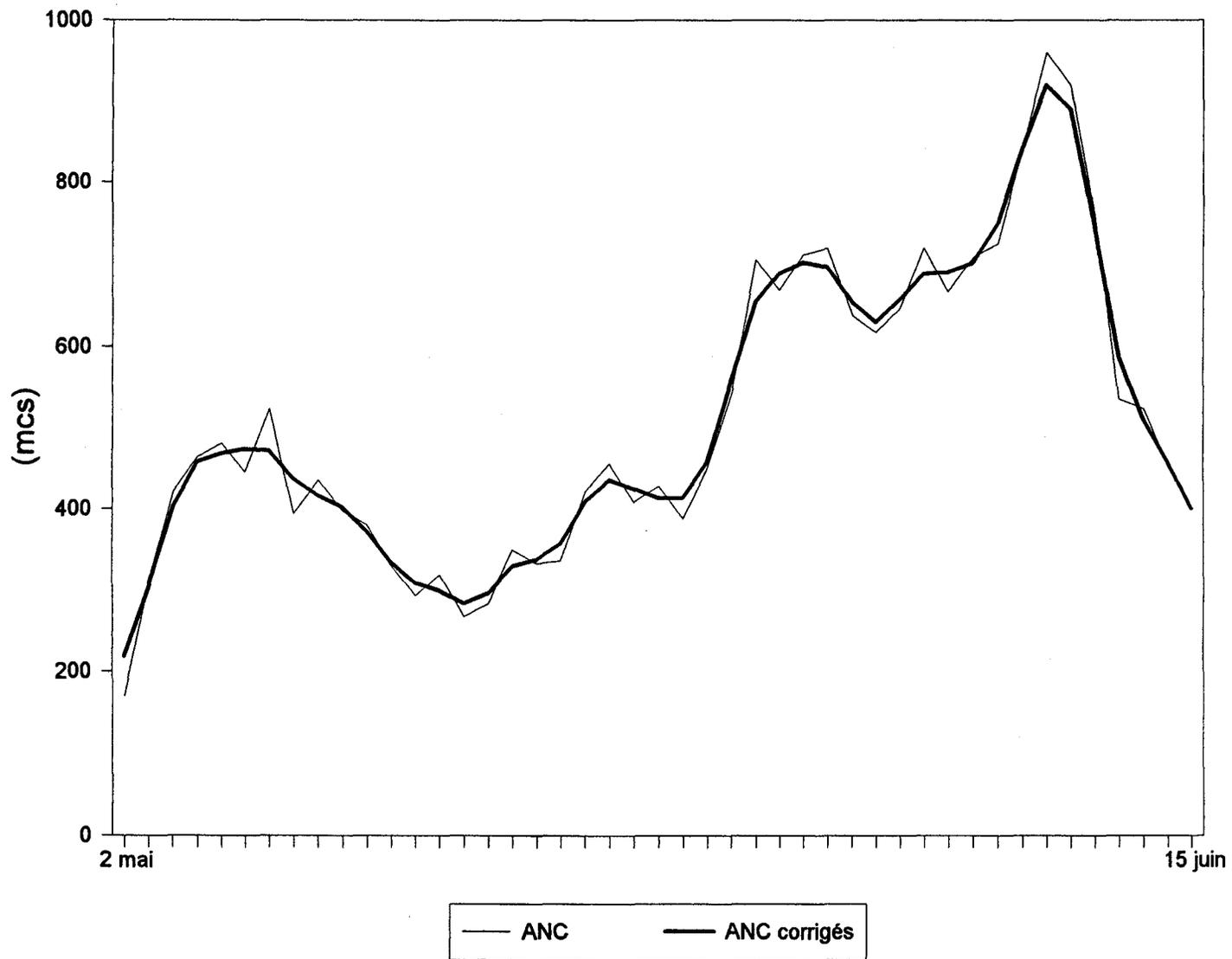


Figure C.14 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Chute du Diable (printemps 1967, saison sèche)

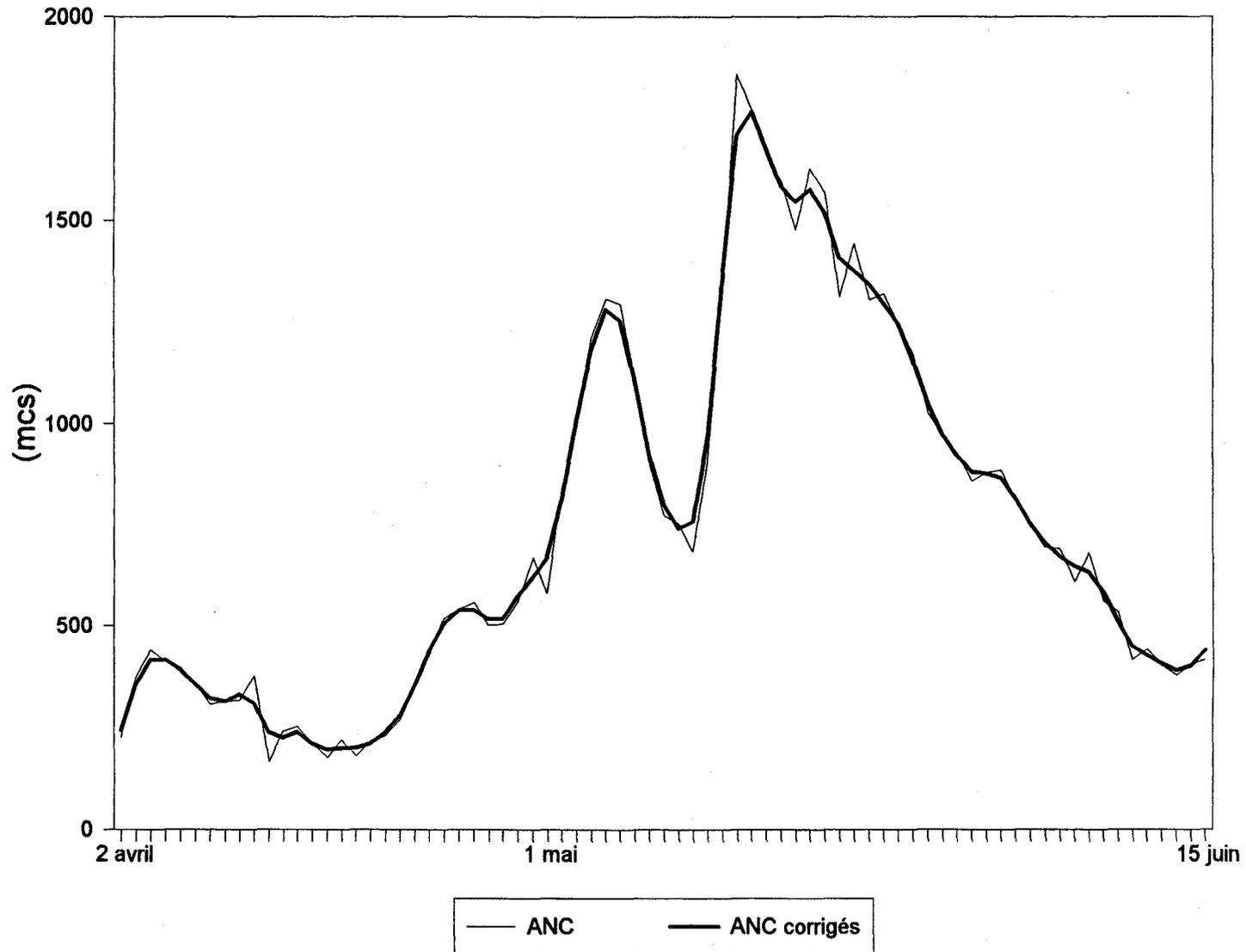


Figure C.15 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Chute du Diable (printemps 1976, saison humide)

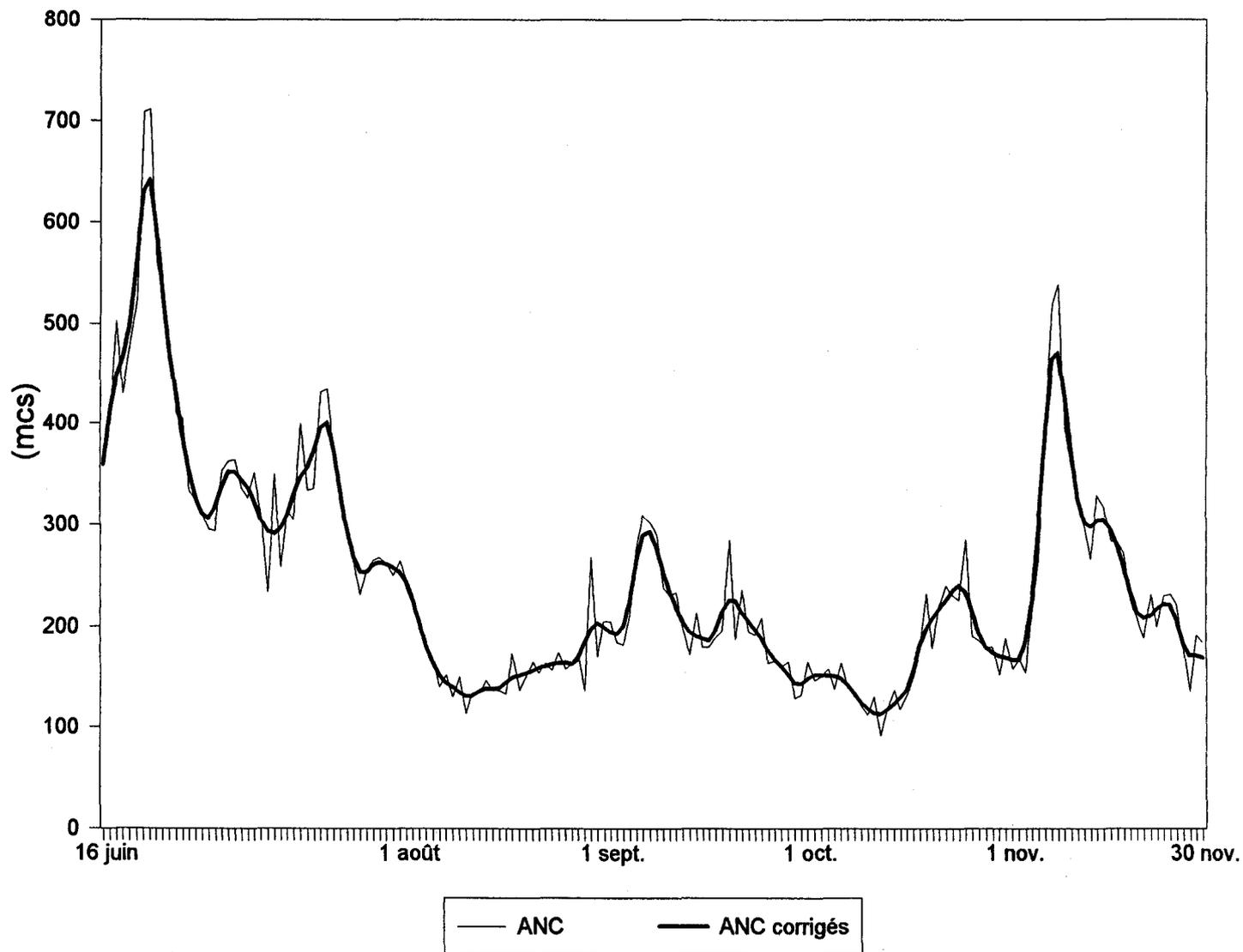


Figure C.16 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Chute du Diabie (été-automne 1982, saison moyenne)

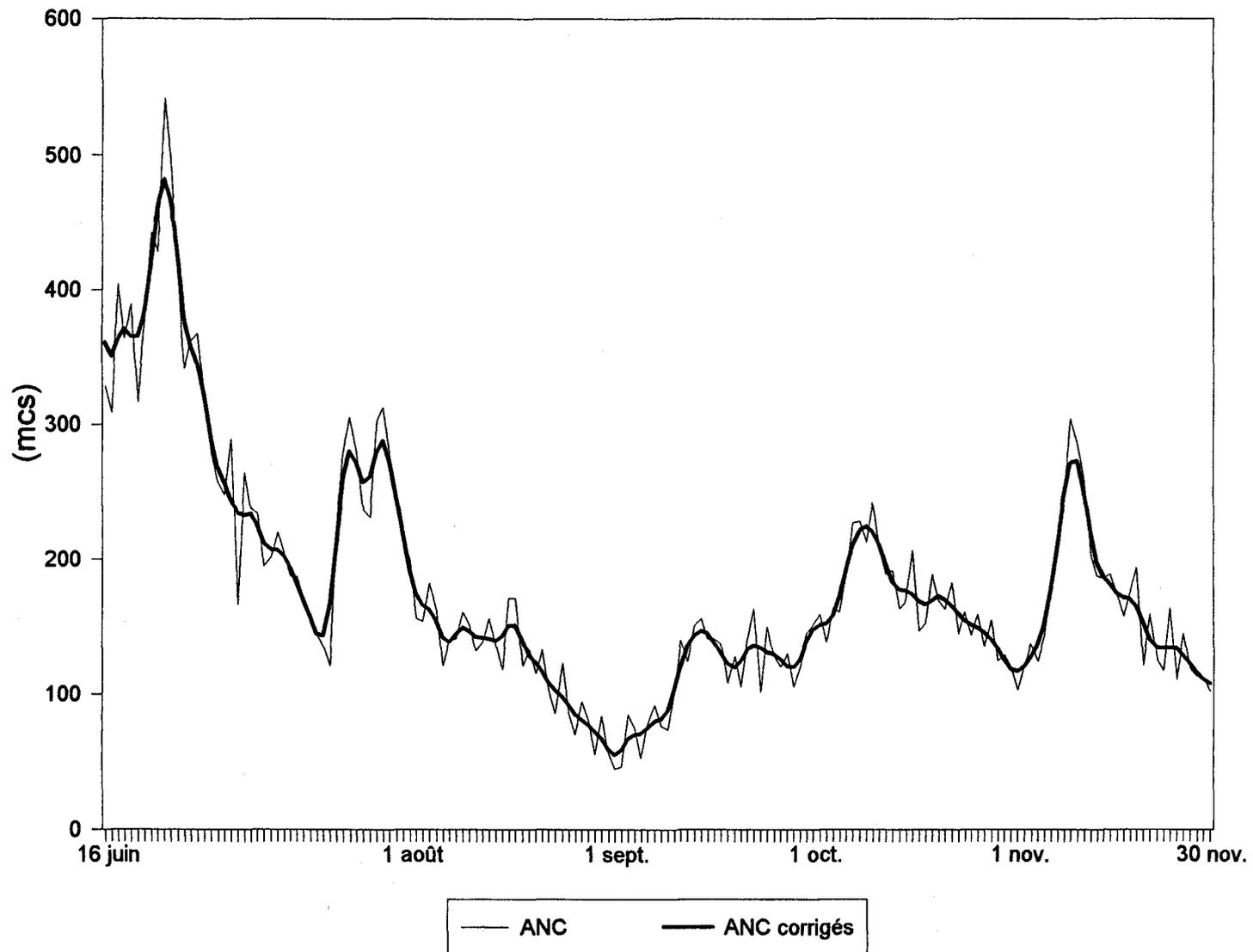


Figure C.17 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Chute du Diable (été-automne 1981, saison sèche)

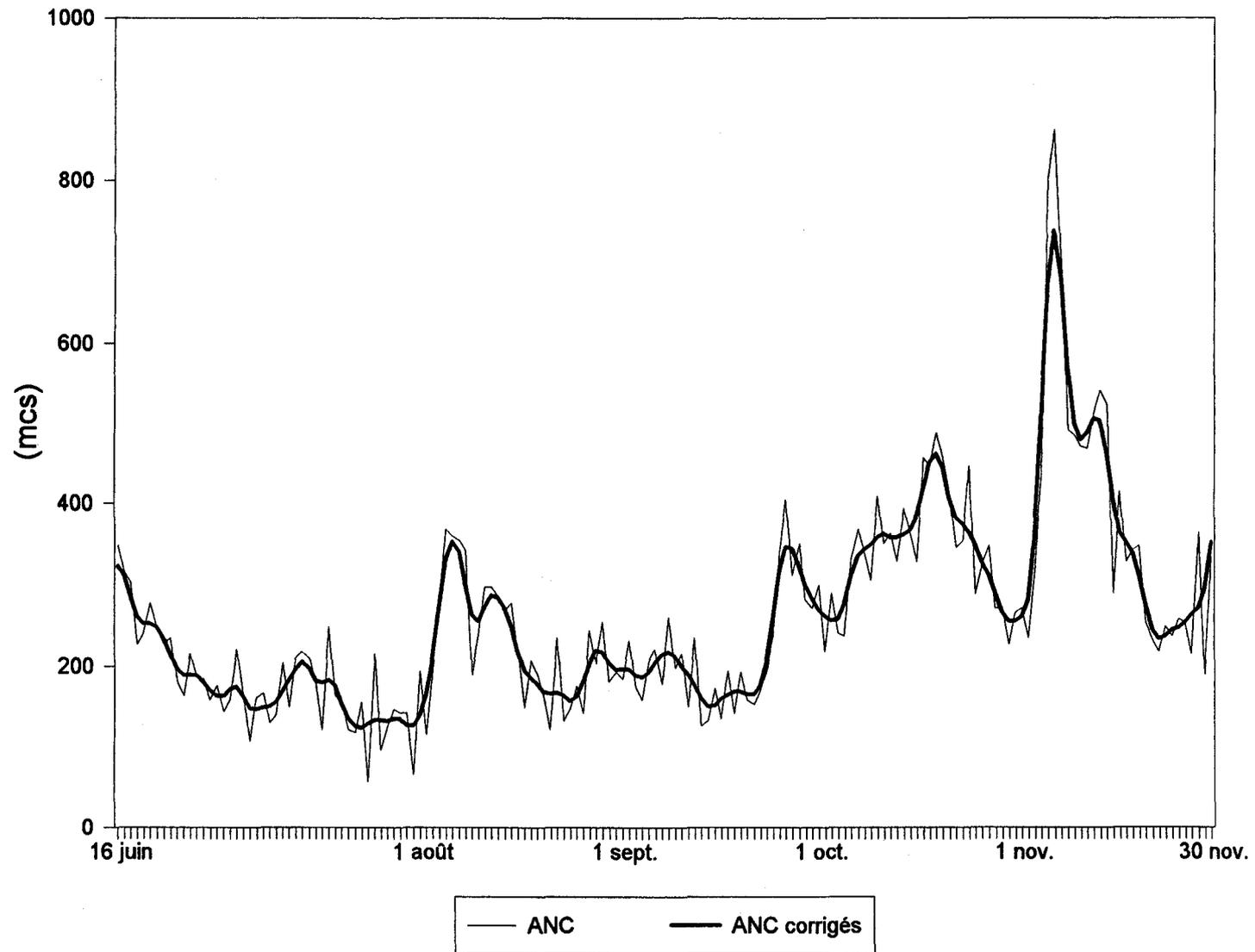


Figure C.18 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Chute du Diable (été-automne 1966, saison humide)

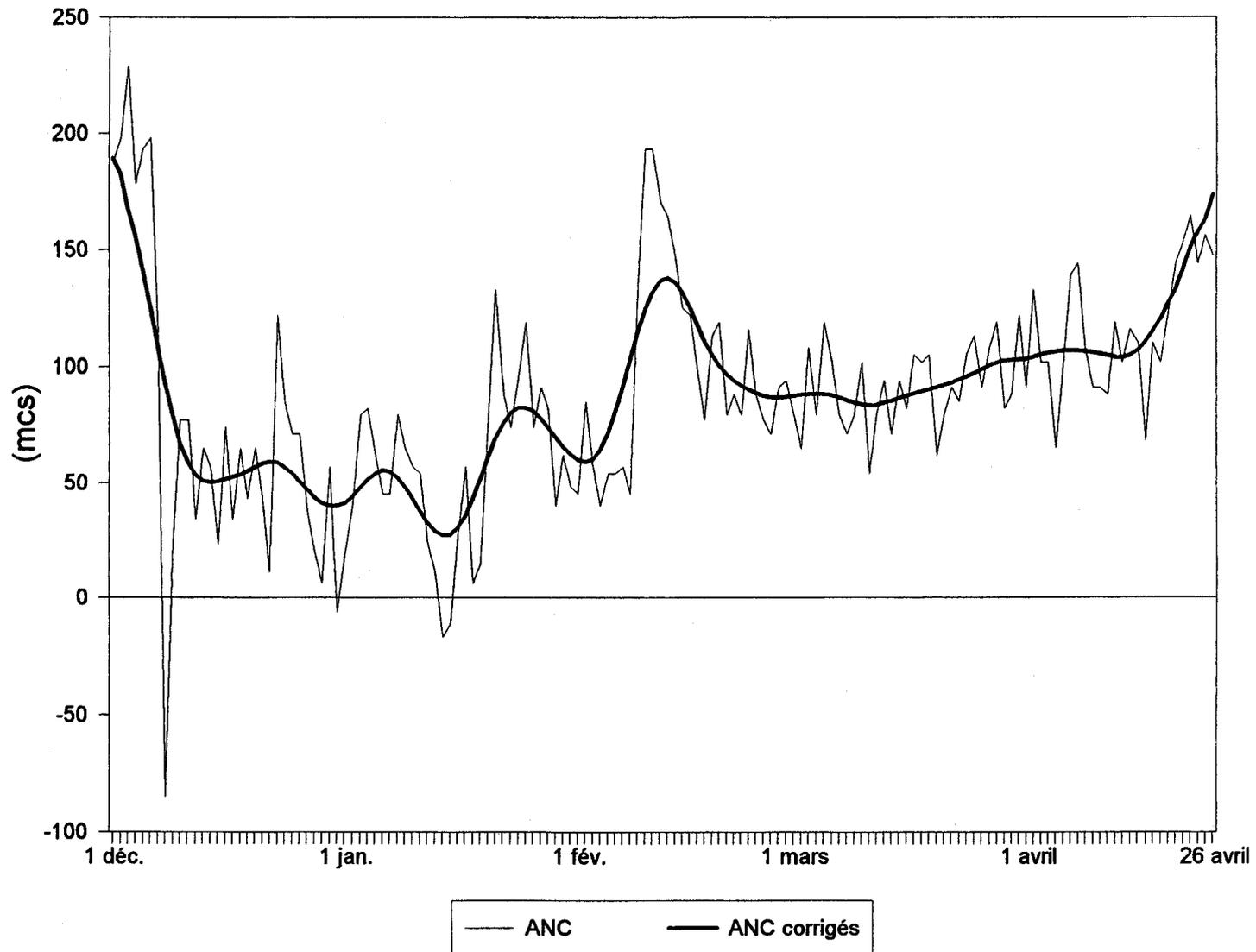


Figure C.19 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Passes-Dangereuses (hiver 1963-1964, saison moyenne)

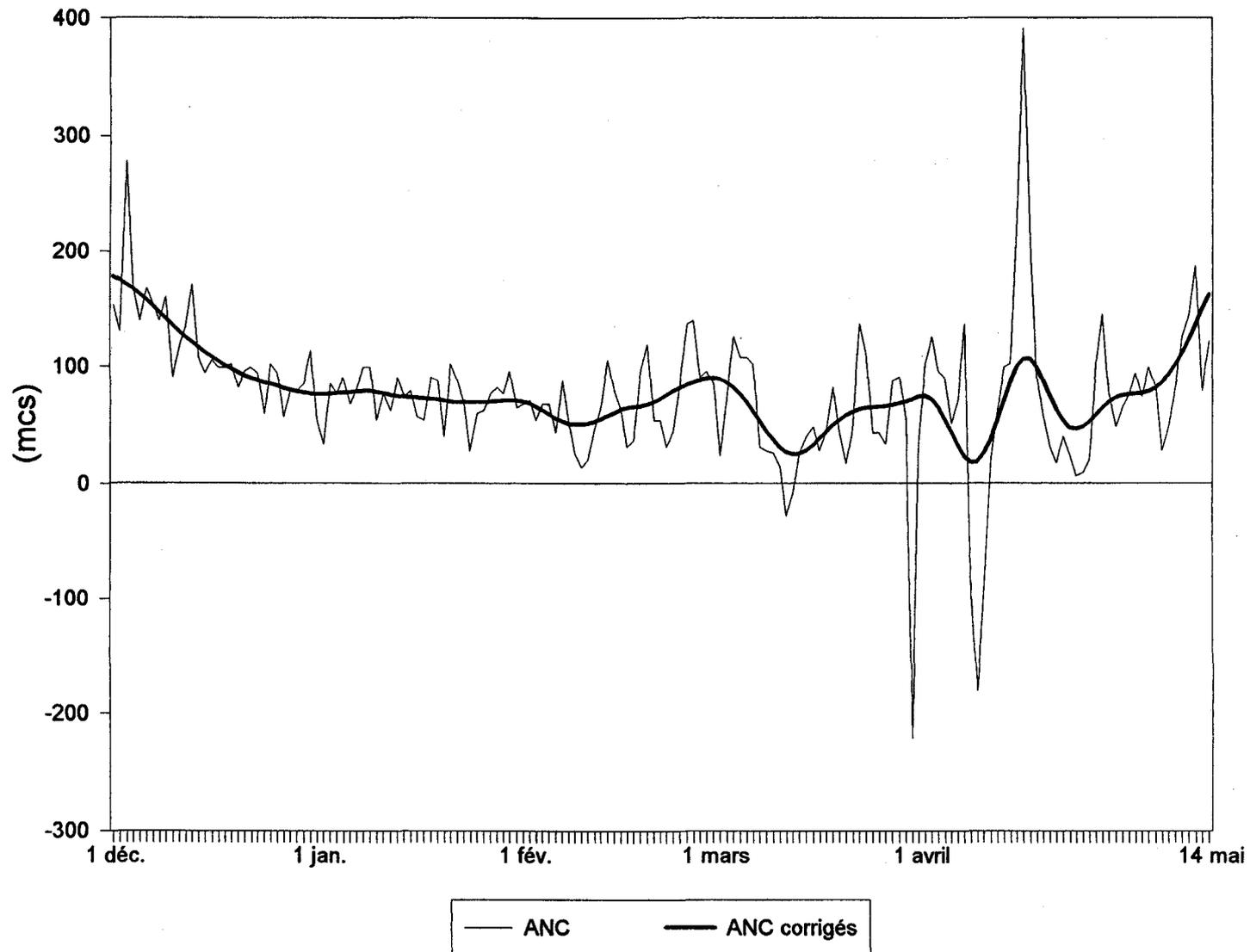


Figure C.20 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Passes-Dangereuses (hiver 1955-1956, saison sèche)

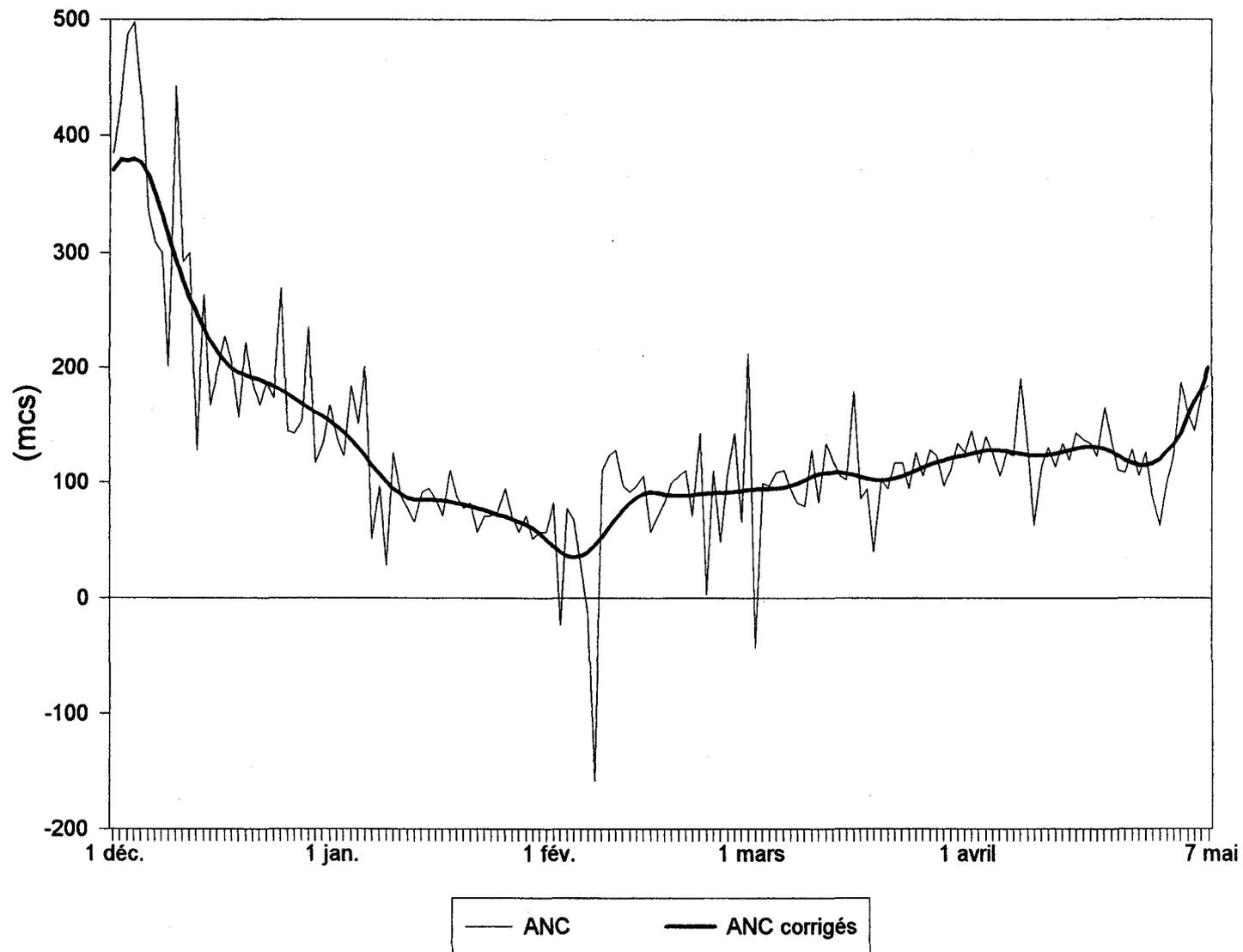


Figure C.21 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Passes-Dangereuses (hiver 1966-1967, saison humide)



Figure C.22 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Passes-Dangereuses (printemps 1959, saison moyenne)

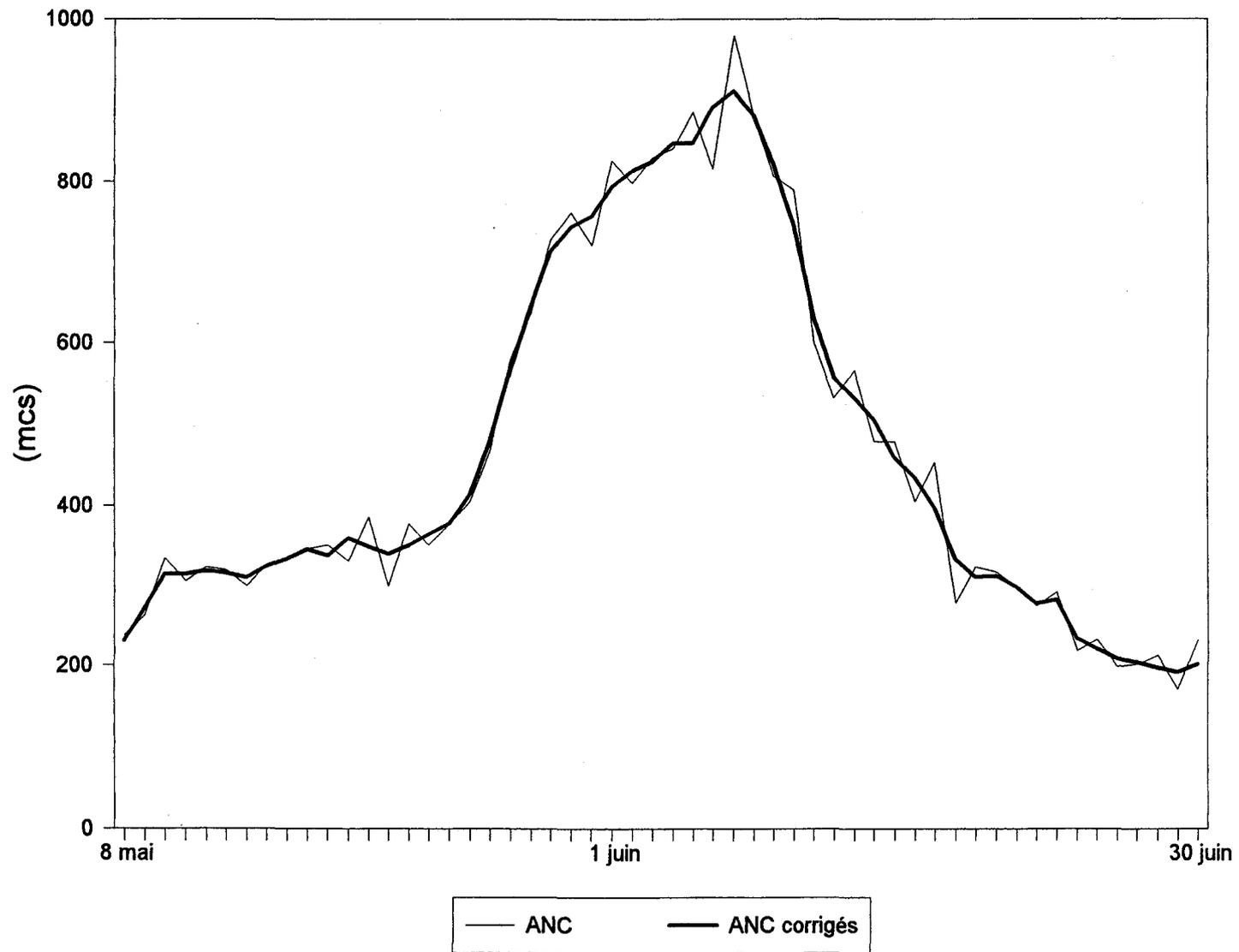


Figure C.23 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Passes-Dangereuses (printemps 1967, saison sèche)

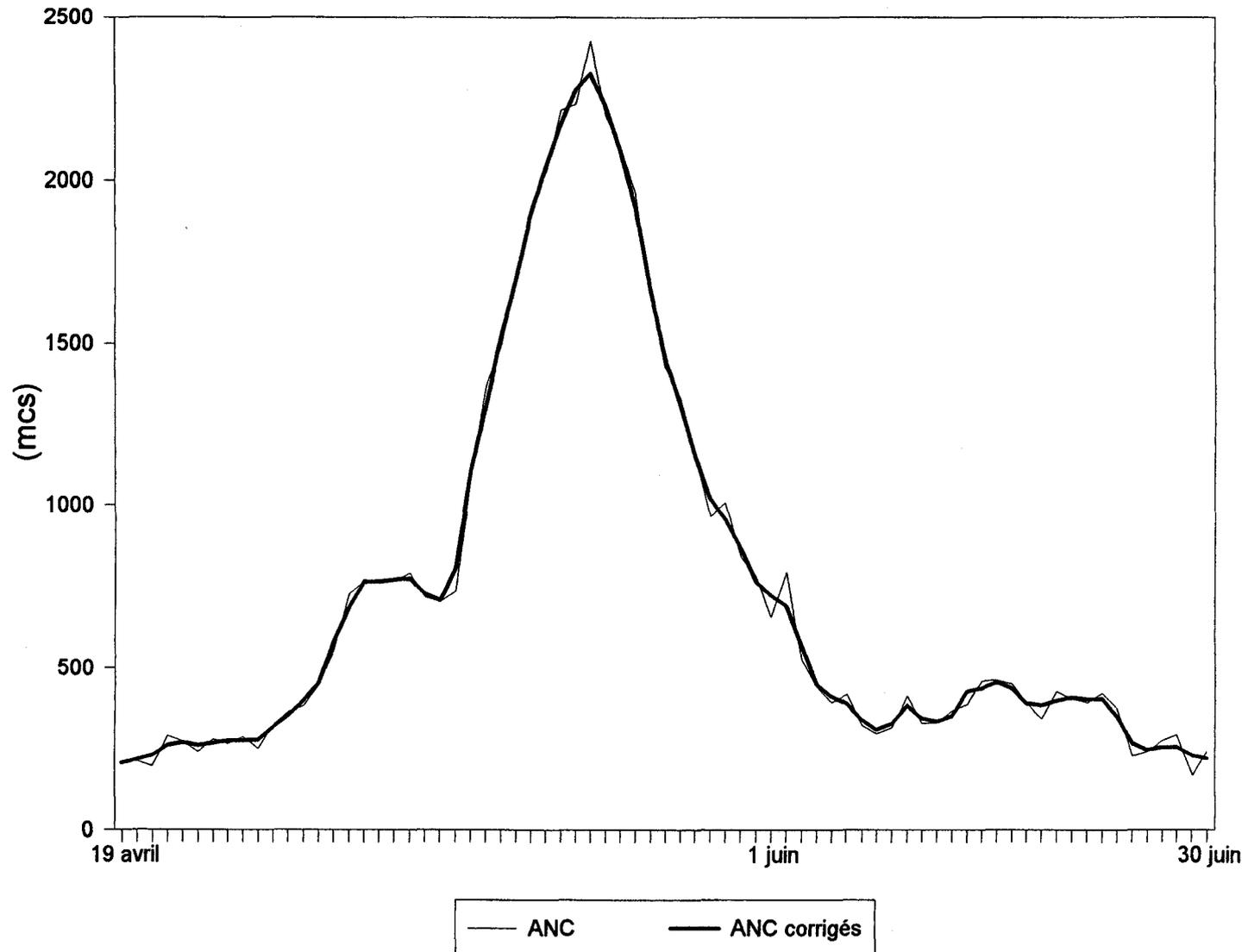


Figure C.24 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Passes-Dangereuses (printemps 1976, saison humide)

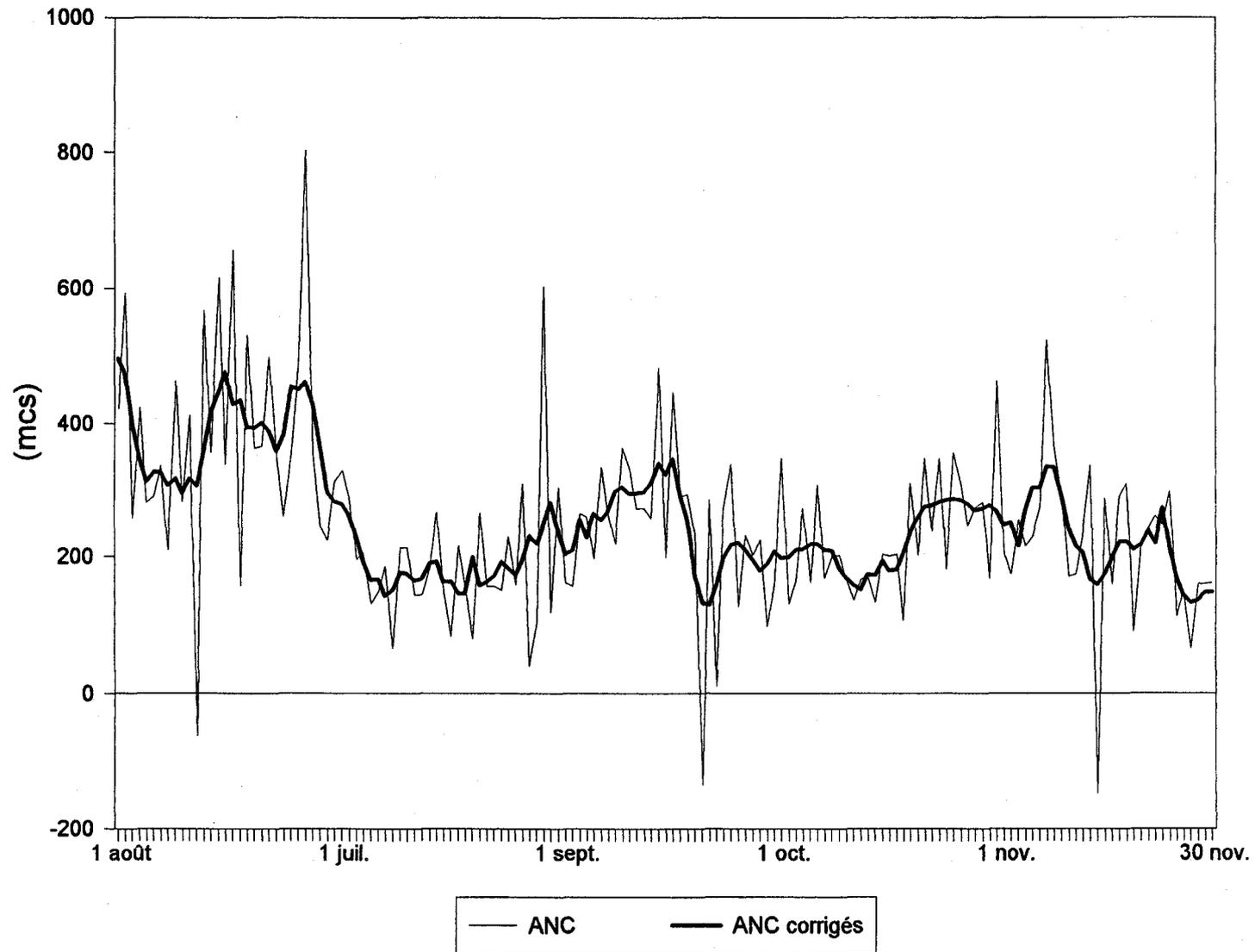


Figure C.25 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Passes-Dangereuses (été-automne 1982, saison moyenne)

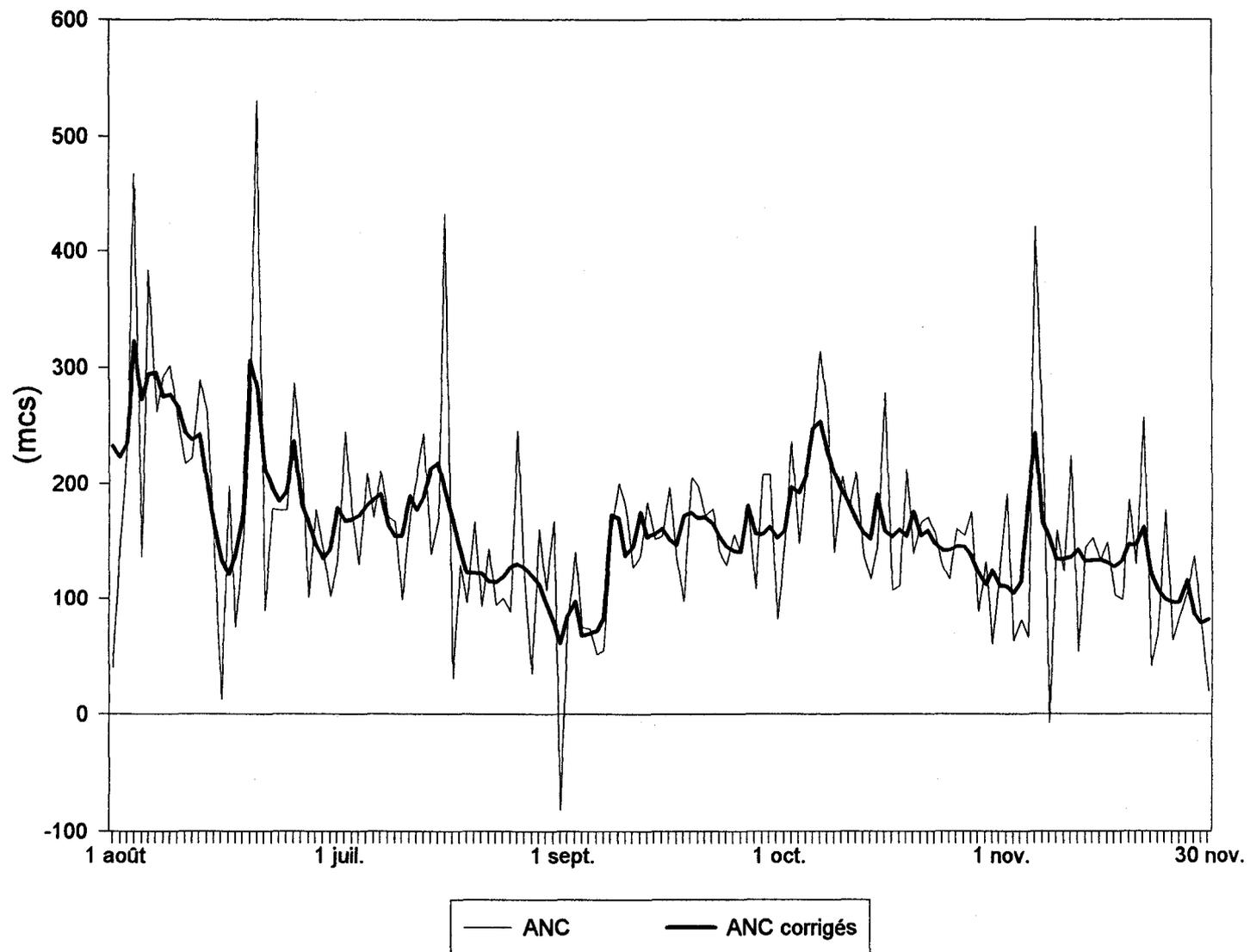


Figure C.26 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Passes-Dangereuses (été-automne 1981, saison sèche)

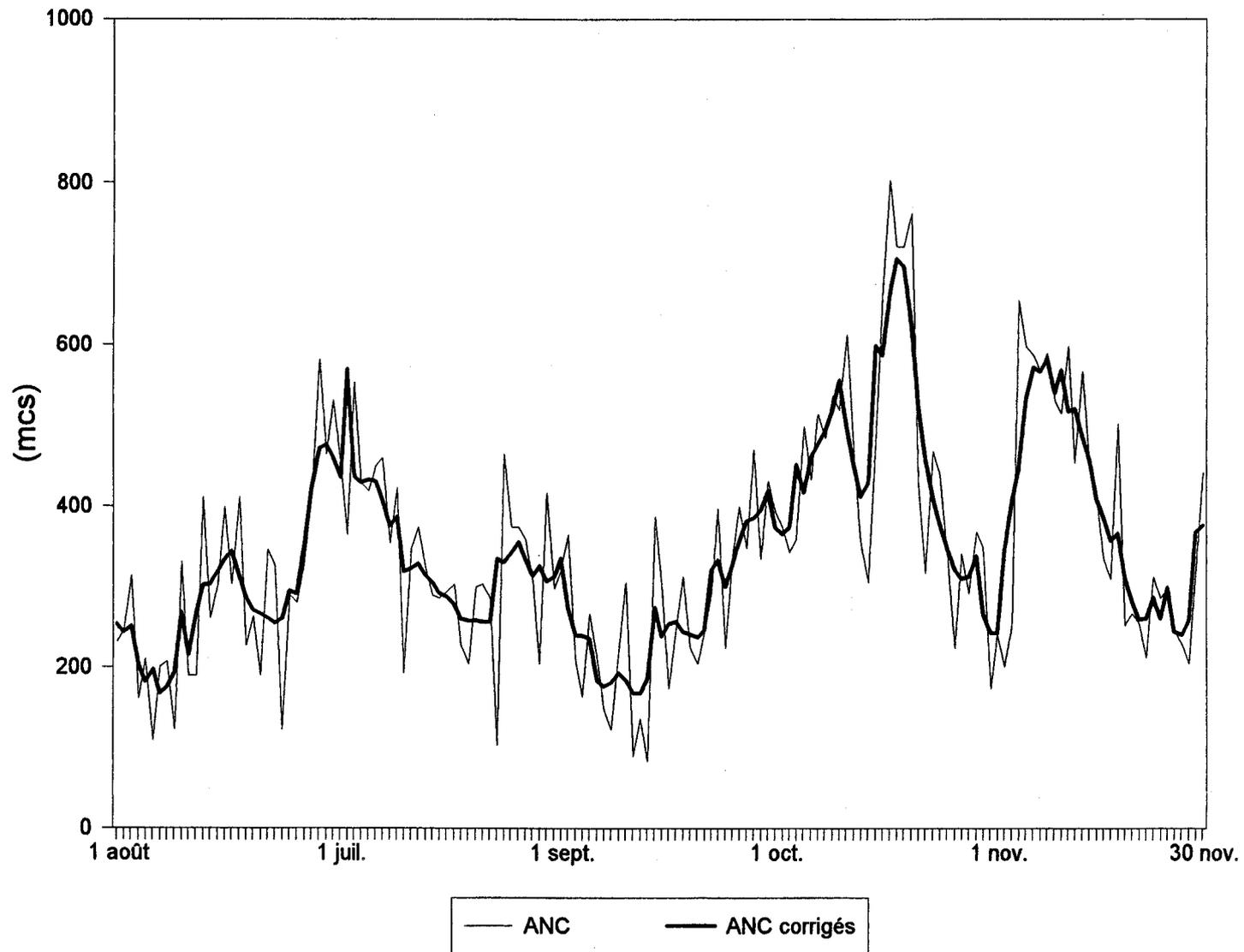


Figure C.27 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir de Passes-Dangereuses (été-automne 1966, saison humide)

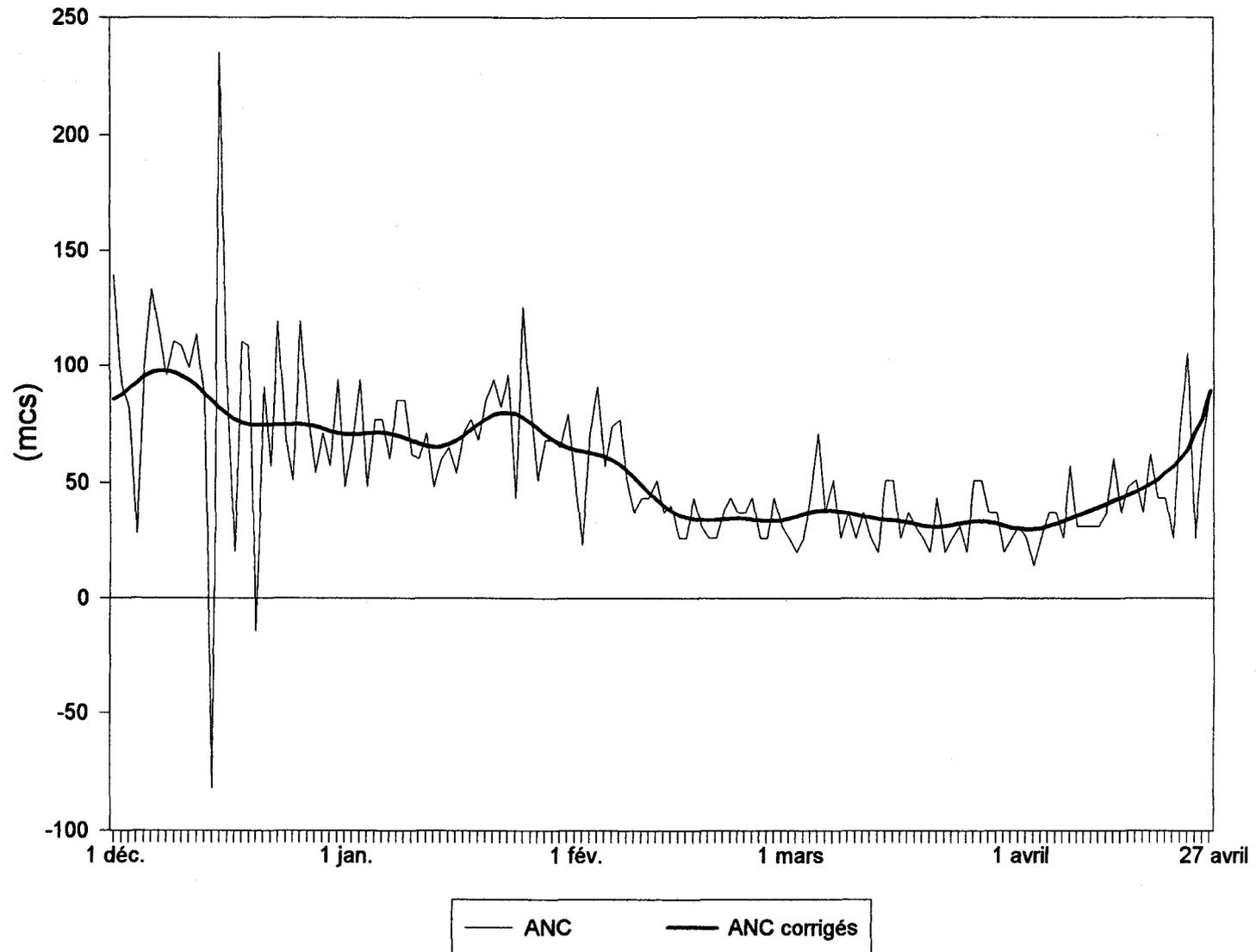


Figure C.28 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac Manouane (hiver 1963-1964, saison moyenne)

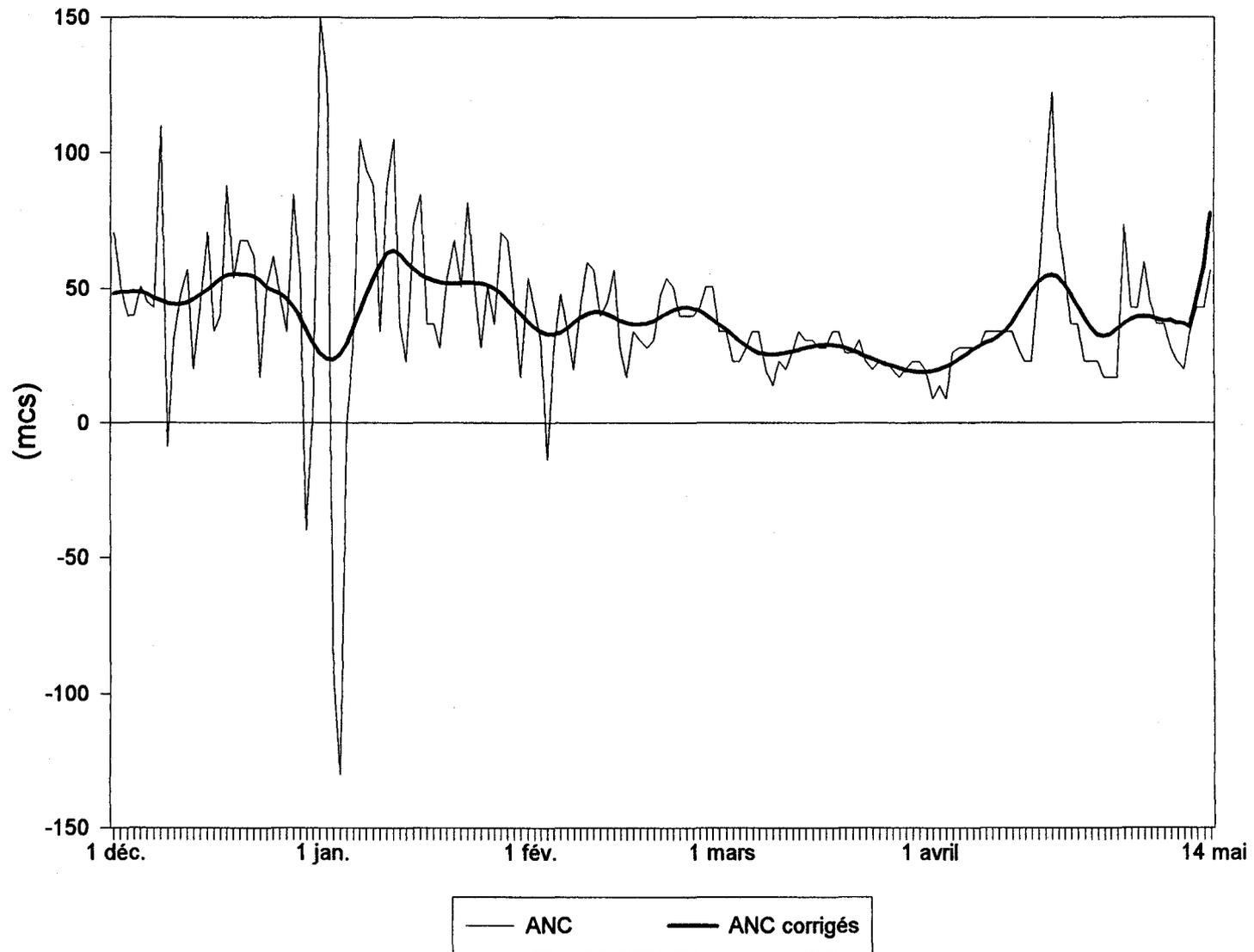


Figure C.29 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac Manouane (hiver 1955-1956, saison sèche)

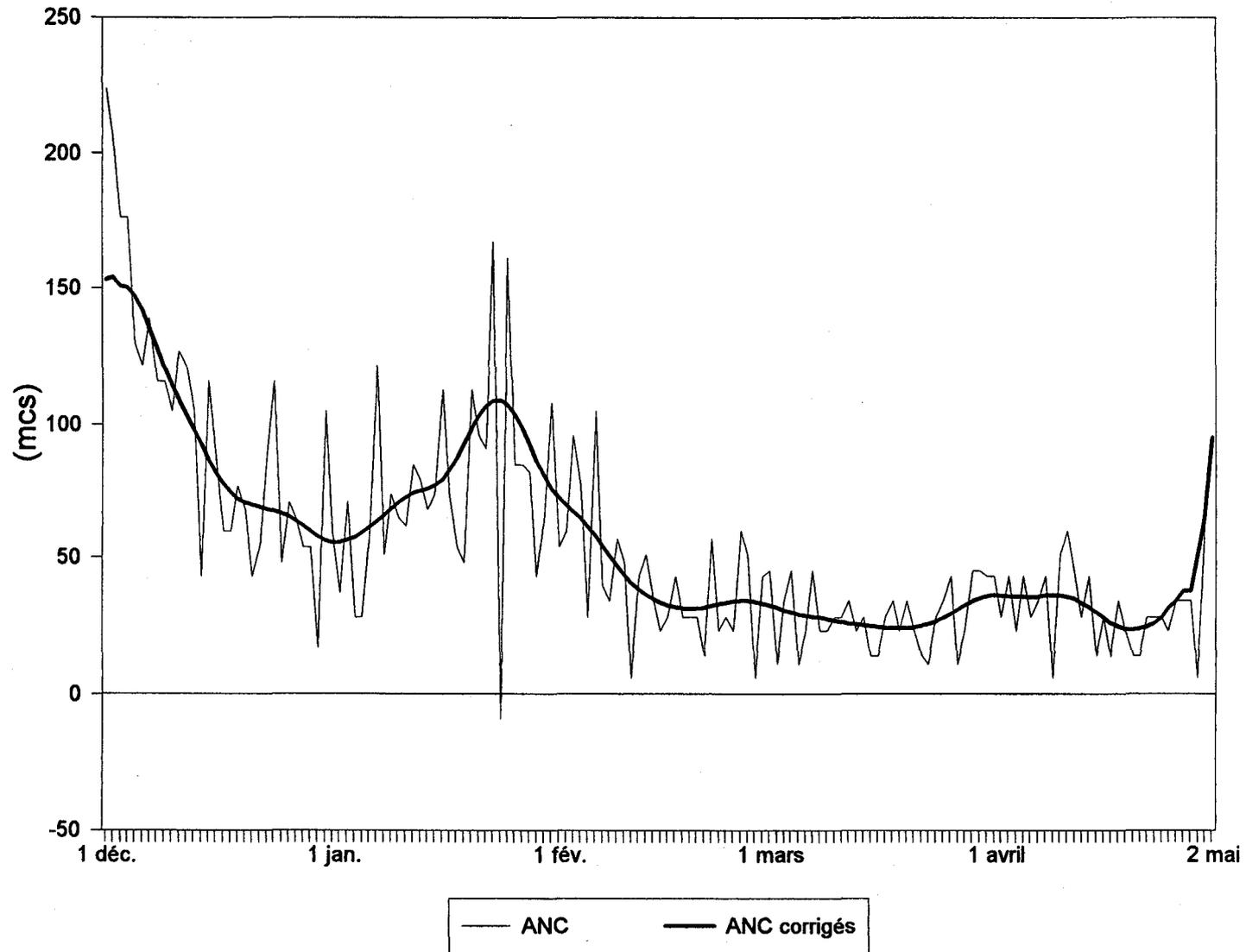


Figure C.30 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac Manouane (hiver 1966-1967, saison humide)

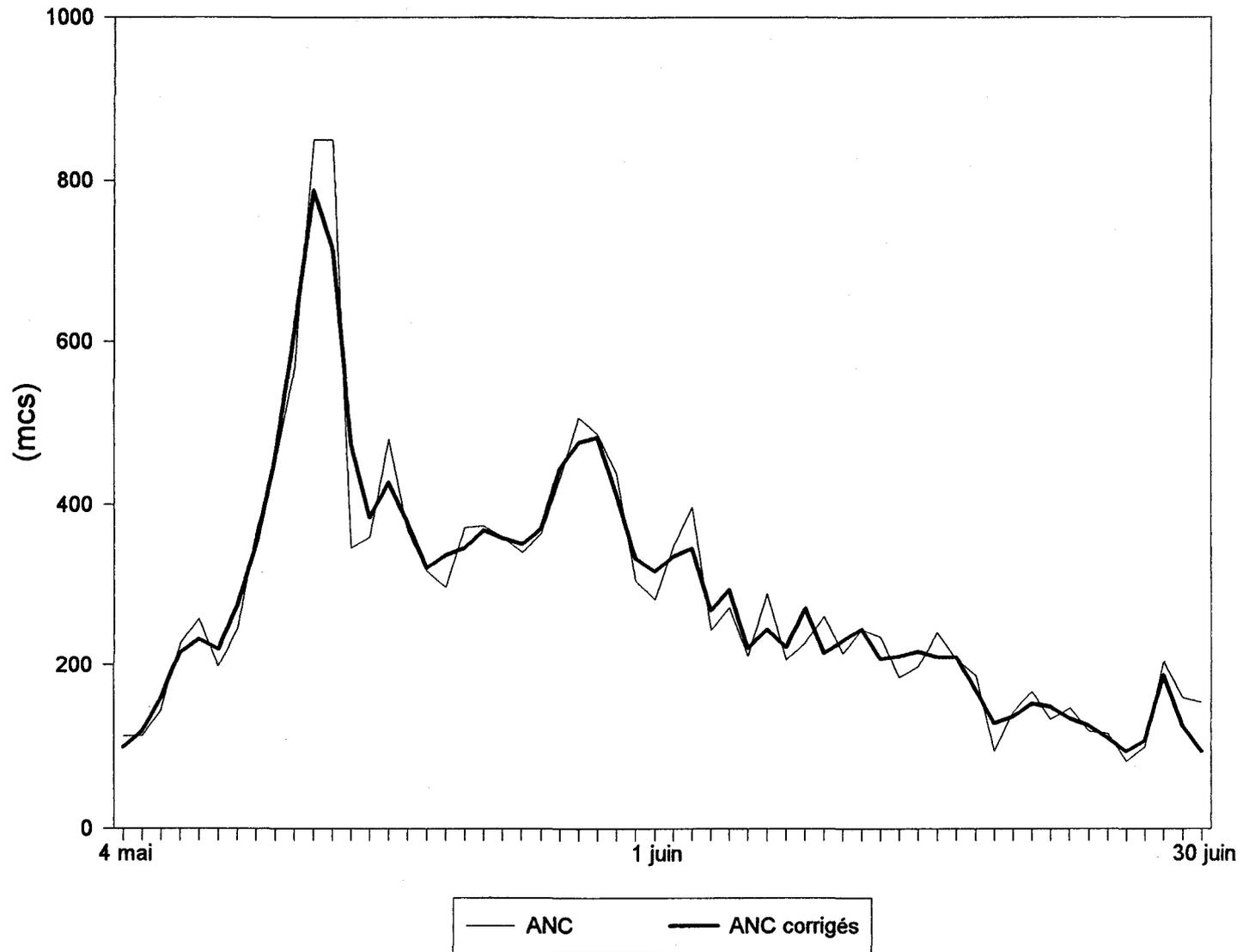


Figure C.31 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac Manouane (printemps 1959, saison moyenne)

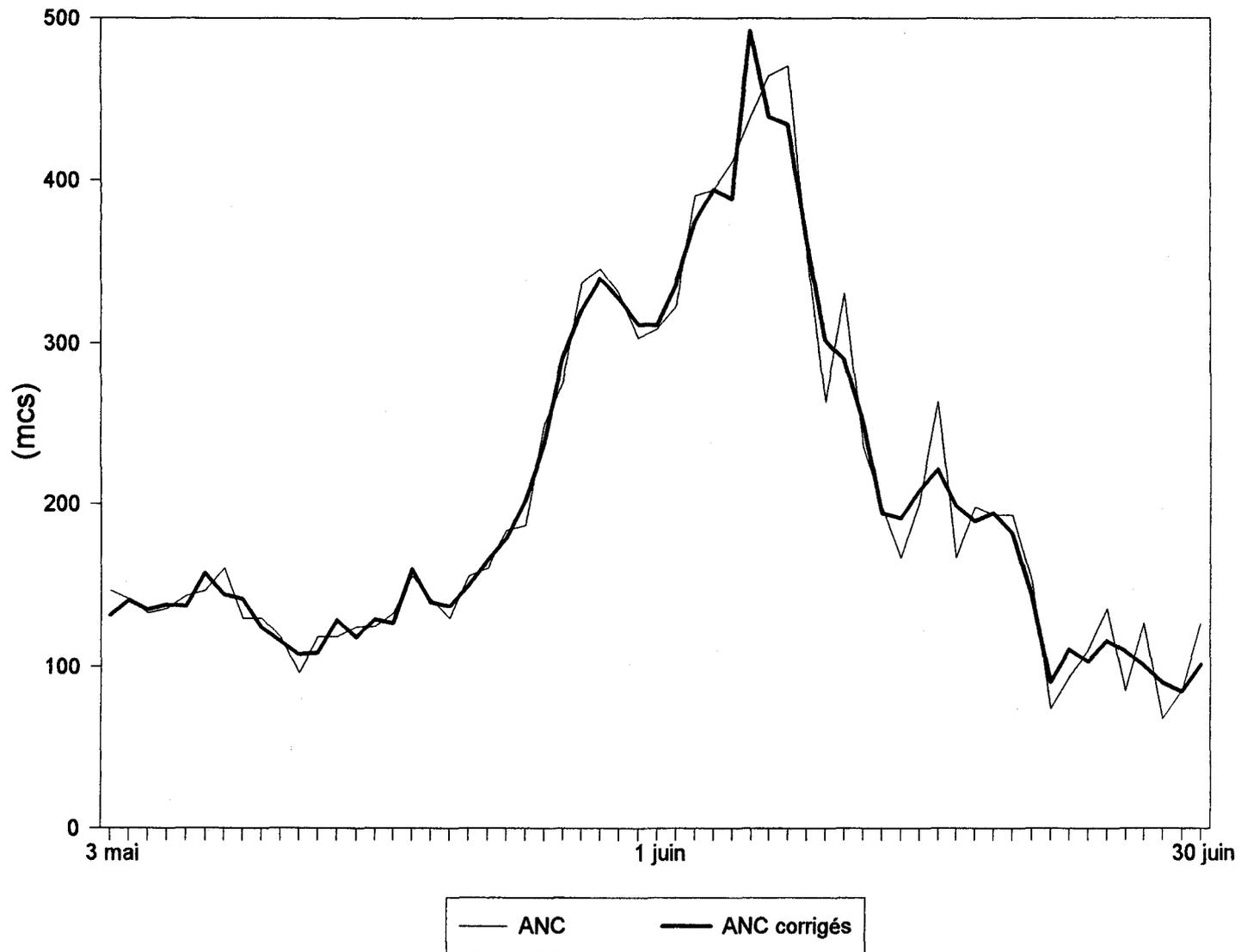


Figure C.32 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac Manouane (printemps 1967, saison sèche)

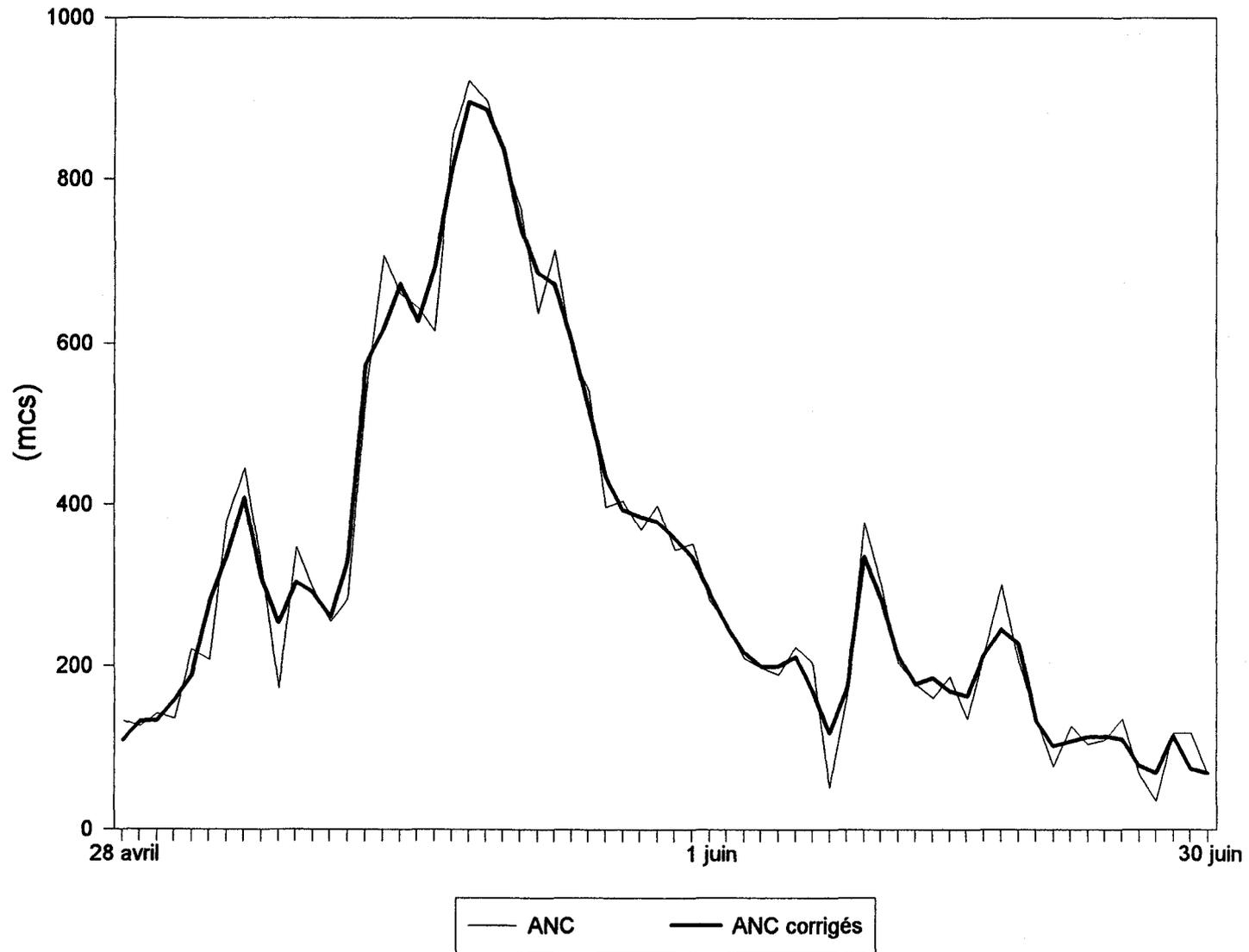


Figure C.33 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac Manouane (printemps 1976, saison humide)

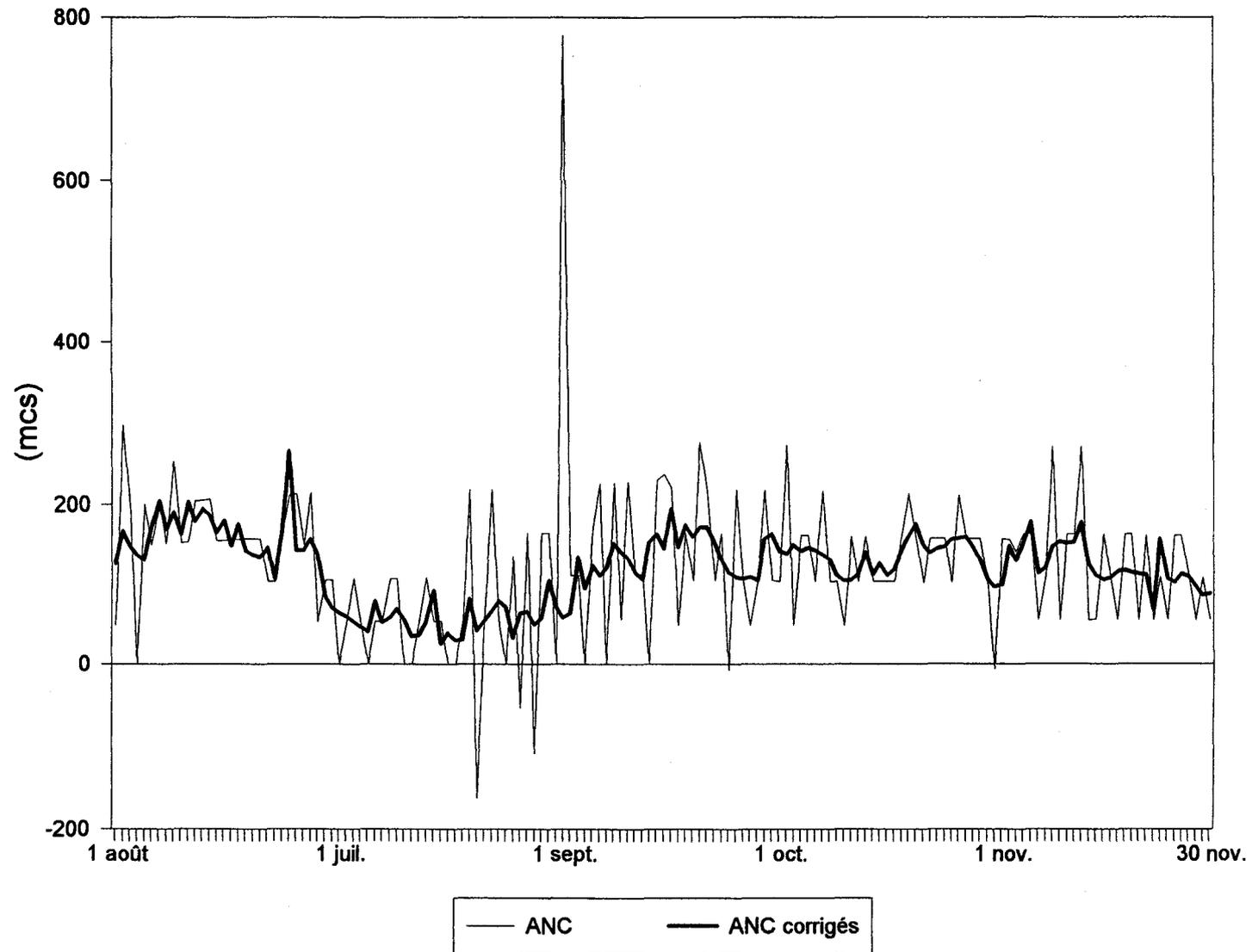


Figure C.34 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac Manouane (été-automne 1982, saison moyenne)

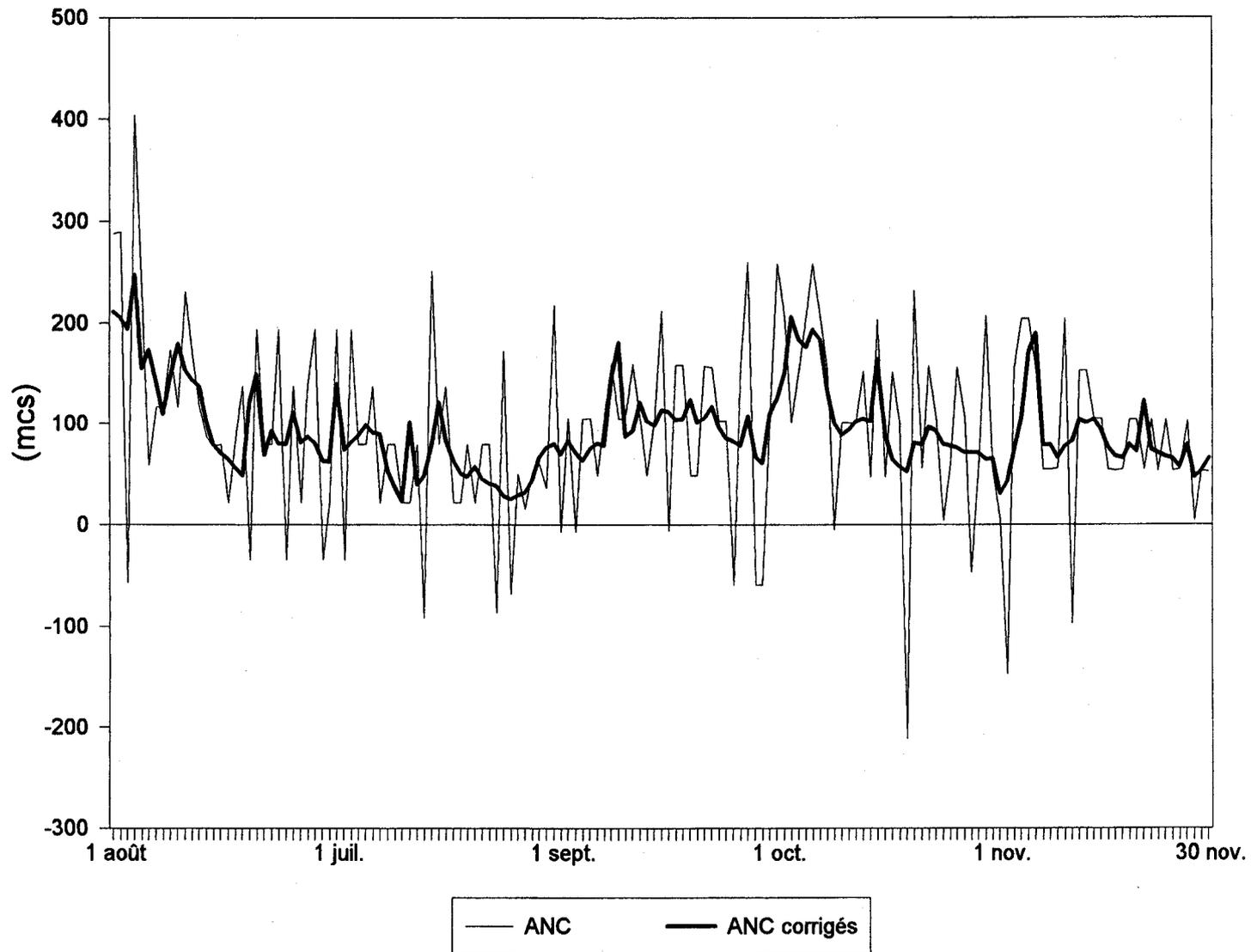


Figure C.35 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac Manouane (été-automne 1981, saison sèche)

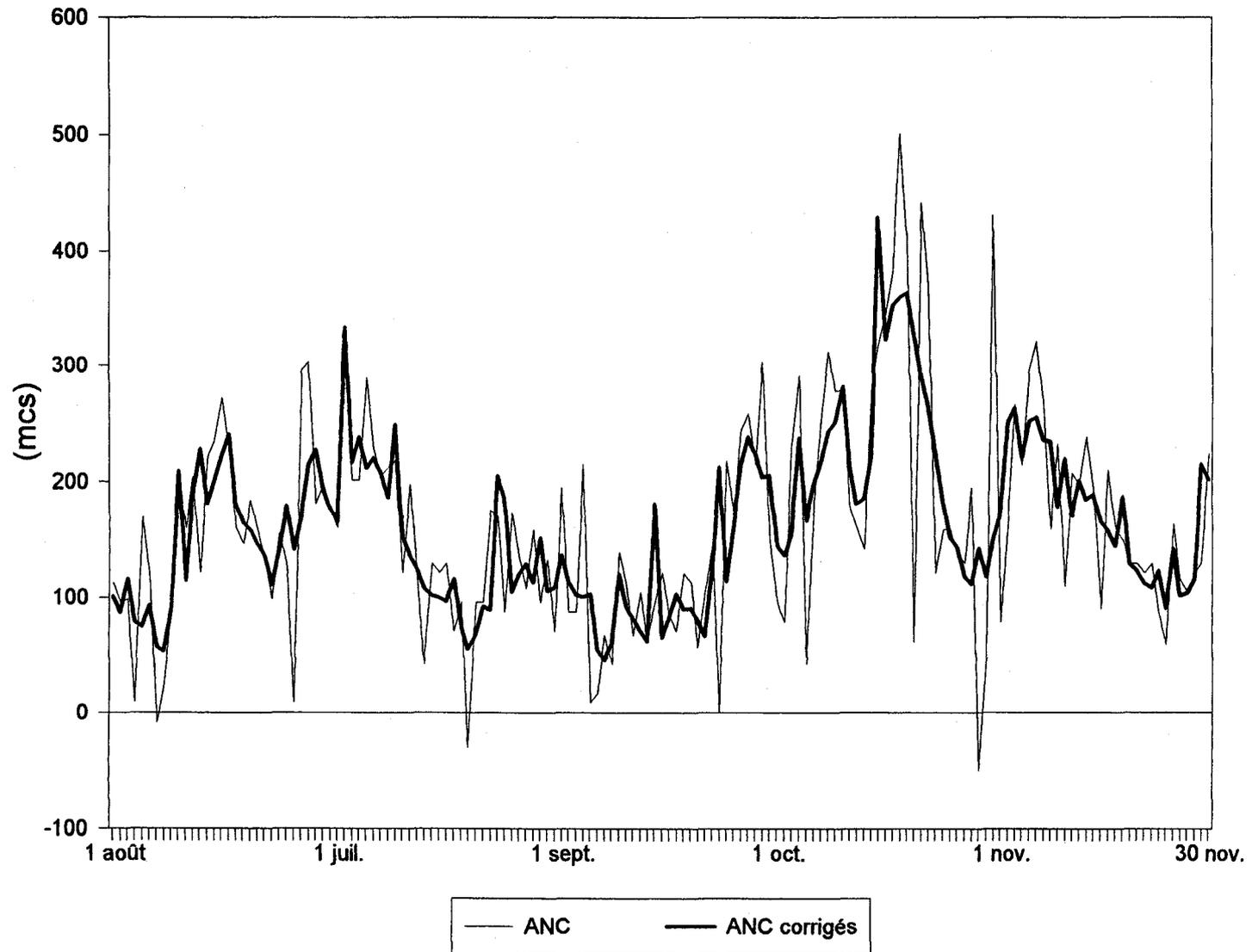


Figure C.36 Apports non contrôlés (ANC) et apports non contrôlés corrigés du réservoir du lac Manouane (été-automne 1966, saison humide)