

Record Number:**Author, Monographic:** Morin, G.//Sochanska, W.**Author Role:****Title, Monographic:** Rivière Moisie - Étude du milieu physique - volume 5 : régimes thermiques de la rivière Moisie avant et après détournement de la rivière aux Pékans**Translated Title:****Reprint Status:****Edition:****Author, Subsidiary:****Author Role:****Place of Publication:** Québec**Publisher Name:** INRS-Eau**Date of Publication:** 1990**Original Publication Date:** Décembre 1990**Volume Identification:****Extent of Work:** xi, 201**Packaging Method:** pages incuant 3 annexes**Series Editor:****Series Editor Role:****Series Title:** INRS-Eau, Rapport de recherche**Series Volume ID:** 296**Location/URL:****ISBN:** 2-89146-293-9**Notes:** Rapport annuel 1990-1991**Abstract:** Rapport rédigé pour Hydro-Québec, Vice-présidence Environnement. (Projet d'aménagement hydroélectrique de la rivière Sainte-Marguerite)
30.00\$**Call Number:** R000296**Keywords:** rapport/ ok/ dl

HYDRO-QUÉBEC
VICE-PRÉSIDENCE ENVIRONNEMENT

Projet d'aménagement hydroélectrique
de la rivière Sainte-Marguerite

**RIVIERE MOISIE - ÉTUDE DU MILIEU
PHYSIQUE - VOLUME 5: RÉGIMES
THERMIQUES DE LA RIVIERE MOISIE
AVANT ET APRES DÉTOURNEMENT DE LA
RIVIERE AUX PÉKANS**

par

Guy Morin
Wanda Sochanski

INRS-EAU
2800, rue Einstein, suite 105
C.P. 7500
Sainte-Foy (Québec)
G1V 4C7

Rapport scientifique No 296

Décembre 1990

ÉTUDE DU MILIEU PHYSIQUE

RIVIERE MOISIE

LISTE DES VOLUMES

Volume No	Description
1	<u>Rapport de synthèse</u> , par L.G.L. & Associés
2	<u>Géomorphologie et régime sédimentaire</u> , par L.G.L. & Associés
3A	<u>Régime hydrologique, textes, figures et tableaux</u> , par L.G.L. & Associés
3B	<u>Régime hydrologique, annexes 1 à 9</u> , par L.G.L. & Associés
3C	<u>Régime hydrologique, annexes 10 et 11</u> , par L.G.L. & Associés
4A	<u>Régime hydraulique à surface libre</u> , par L.G.L. & Associés
4B	<u>Régime glaciologique, prise des glaces</u> , par L.G.L. & Associés
4C	<u>Régime glaciologique, départ des glaces</u> , par L.G.L. & Associés
5	<u>Régime thermique</u> , par INRS-Eau
6	<u>Dynamique de l'Estuaire</u> , par INRS-Océanologie

REMERCIEMENTS

Les auteurs désirent remercier monsieur André Boudreault de la firme Groupe Environnement Shooner Inc. pour nous avoir fourni les données physiographiques des principales rivières du bassin versant de la rivière Moisie et les températures de l'eau mesurées au Clud de pêche Saumon Moisie Inc.

Monsieur Yves Grimard du ministère de l'Environnement du Québec pour nous avoir fait parvenir toutes les données de qualité de l'eau en rivière mesurées à l'exutoire du bassin versant de la rivière Moisie au pont de la Route 138.

Monsieur Jean-Louis Bission, Direction planification de l'exploitation du parc d'équipement d'Hydro-Québec qui a bien voulu nous transmettre toutes les données météorologiques et hydrométriques disponibles pour le bassin versant de la rivière Moisie.

RESPONSABLE DE L'ÉTUDE à HYDRO-QUÉBEC

Les responsables de l'étude à la Vice-présidence Environnement sont monsieur Gérard Labrecque, chargé de projet, monsieur Tonino J. Nzakimuena, conseiller en hydrologie et madame Geneviève Corfa, conseillère en milieu naturel.

TABLE DES MATIERES

	Page
REMERCIEMENTS	i
TABLE DES MATIERES	ii
LISTE DES TABLEAUX	iv
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES ANNEXES.....	xi
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 MODÉLISATION DU RÉGIME HYDROLOGIQUE DE LA RIVIERE MOISIE NATUREL ET APRES DÉRIVATION.....	5
1.1 Introduction.....	6
1.2 Modèle hydrologique CEQUEAU	6
1.2.1 Schématisation du bassin versant.....	6
1.2.2 Données météorologiques	7
1.2.3 Modèle	8
1.2.4 Calage du modèle	12
1.3 Application du modèle CEQUEAU au bassin versant naturel de la rivière Moisie	14
1.3.1 Banque de données physiographiques et de drainage	14
1.3.2 Données hydro-météorologiques.....	15
1.3.3 Ajustement des paramètres du modèle hydrologique	15
1.3.4 Résultats des simulations hydrologiques.....	16
1.4 Application du modèle CEQUEAU au bassin versant de la rivière Moisie après dérivation d'une partie des rivières aux Pékans et Carheil.....	17
1.4.1 Banque de données physiographiques et de drainage de la rivière Moisie après dérivation	18
1.4.2 Simulation d'une longue série hydrologique.....	18
CHAPITRE 2 MODÉLISATION DU RÉGIME THERMIQUE	37
2.1 Introduction.....	38
2.2 Modèle thermique	38

	Page
2.2.1	Bilan d'énergie 39
2.2.2	Calage du modèle du modèle thermique..... 43
2.3	Application du modèle thermique au bassin versant naturel de la rivière Moisie.. 43
2.3.1	Données météorologiques 44
2.3.2	Données de température de l'eau 44
2.3.3	Ajustement des paramètres du modèle thermique 45
2.3.4	Résultats des simulations du régime thermique 46
CHAPITRE 3	MODÉLISATION D'UNE LONGUE SÉRIE DU RÉGIME
	THERMIQUE DU BASSIN VERSANT NATUREL ET APRES
	DÉRIVATION DE LA RIVIERE MOISIE..... 61
3.1	Introduction..... 62
3.2	Reconstitution des températures de l'eau pour le bassin versant naturel 62
3.3	Simulation des températures de l'eau pour le bassin versant aménagé 63
3.4	Simulation des températures de l'eau pour le bassin versant aménagé avec débits réservés..... 63
3.5	Analyse des résultats 64
CONCLUSION 104
RÉFÉRENCES 107

LISTE DES TABLEAUX

	Page
TABLEAU 1.1 Paramètres et constantes intervenant dans le modèle CEQUEAU.....	19
TABLEAU 1.2 Données météorologiques et hydrométriques disponibles dans la région de la rivière Moisie.....	20
TABLEAU 1.3 Valeurs finales des paramètres du modèle CEQUEAU ajusté au bassin versant de la rivière Moisie.....	21
TABLEAU 1.4 Critère numérique annuel pour la période de calibration et de vérification.....	22
TABLEAU 2.1 Paramètres intervenant dans le modèle thermique	49
TABLEAU 2.2 Données météorologiques moyennes mensuelles utilisées pour les simulations de la température de l'eau de la rivière Moisie.....	51
TABLEAU 2.3 Valeurs finales des paramètres du modèle thermique.....	52
TABLEAU 3.1 Stations fictives pour le calcul des températures de l'eau en rivière pour la rivière Moisie et aux Pékans.....	68
TABLEAU 3.2 Températures de l'eau moyenne journalière (°C) sortant du réservoir Carheil-aux Pékans	69
TABLEAU 3.3 Températures journalières (°C) classées pour le bassin versant naturel de la rivière Moisie pour tous les jours de l'année de la période 1961 à 1989.....	70
TABLEAU 3.4 Températures journalières (°C) classées pour le bassin versant aménagé de la rivière Moisie pour tous les jours de l'année de la période 1961 à 1989.....	71
TABLEAU 3.5 Températures journalières (°C) classées pour le bassin versant aménagé de la rivière Moisie avec débits réservés pour tous les jours de l'année de la période 1961 à 1989.....	72
TABLEAU 3.6 Températures journalières (°C) classées pour le bassin versant naturel de la rivière Moisie du 1 ^{er} mai au 30 novembre de la période 1961 à 1989.....	73

TABLEAU 3.7	Températures journalières (°C) classées pour le bassin versant aménagé de la rivière Moisie du 1 ^{er} mai au 30 novembre de la période 1961 à 1989	74
TABLEAU 3.8	Températures journalières (°C) classées pour le bassin versant aménagé de la rivière Moisie avec débits réservés du 1 ^{er} mai au 30 novembre de la période 1961 à 1989	75

LISTE DES FIGURES

		Page
FIGURE 1.1	Schéma de production du modèle CEQUEAU	23
FIGURE 1.2	Schématisation de la fonction de transfert.....	24
FIGURE 1.3	Schématisation du bassin versant naturel de la rivière Moisie	25
FIGURE 1.4	Emplacement de la rivière Moisie et ses principaux tributaires par rapport à la schématisation utilisée par le modèle CEQUEAU.....	26
FIGURE 1.5	Débits journaliers, observés et calculés, classés, station 072301	27
FIGURE 1.6	Débits journaliers, observés et calculés, classés, station 072302.....	28
FIGURE 1.7	Débits moyens mensuels observés et calculés, station 072301	29
FIGURE 1.8	Débits moyens mensuels observés et calculés, station 072302	30
FIGURE 1.9	Débits journaliers maximaux mensuels observés et calculés, station 072301.....	31
FIGURE 1.10	Débits journaliers maximaux mensuels observés et calculés, station 072302.....	32
FIGURE 1.11	Schématisation du bassin versant de la rivière Moisie après dérivation partielle des rivières aux Pékans et Carheil	33
FIGURE 1.12	Débits journaliers classés calculés à la station 072302 de la rivière aux Pékans, pour le bassin versant naturel et après dérivation	34
FIGURE 1.13	Débits journaliers classés calculés sur la Moisie en aval de aux Pékans pour le bassin versant naturel et après dérivation.....	35
FIGURE 1.14	Débits journaliers classés calculés à la station 072301 de la rivière Moisie pour le bassin versant naturel et après dérivation.....	36
FIGURE 2.1	Températures journalières de l'eau calculées et mesurées sur la rivière Moisie pour les années 1973 à 1976.....	53
FIGURE 2.2	Températures journalières de l'eau calculées et mesurées sur la rivière Moisie pour les années 1977 à 1984.....	54

FIGURE 2.3	Températures journalières de l'eau calculées et mesurées sur la rivière Moisie pour les années 1985 à 1989.....	55
FIGURE 2.4	Températures de l'eau calculées et mesurées par thermographe à la station TMOI005 sur la rivière Moisie pour l'année 1989.....	56
FIGURE 2.5	Températures de l'eau calculées et mesurées par thermographe à la station TMOI006 sur la rivière Moisie pour l'année 1989.....	57
FIGURE 2.6	Températures de l'eau calculées et mesurées par thermographe à la station TPEK007 sur la rivière aux Pékans pour l'année 1989.....	58
FIGURE 2.7	Températures de l'eau moyenne calculées pour la période 1961 à 1989 à: Moisie à la station 072301 (c.p. #3), Moisie à la station TMOI006 (c.p. # 46) et aux Pékans à la station 072302 (c.p. #96)	59
FIGURE 2.8	Températures de l'eau médiane pour la période 1961 à 1989 à: Moisie à la station 072301 (c.p. #3), Moisie en aval de la rivière aux Pékans (c.p. #92) et aux Pékans à la station 072302 (c.p. #96) ...	60
FIGURE 3.1	Températures journalières maximales, minimales et médianes calculées avec le bassin versant naturel pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #3 et c.p. #4	76
FIGURE 3.2	Températures journalières maximales, minimales et médianes calculées avec le bassin versant naturel pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #26 et c.p. #46.....	77
FIGURE 3.3	Températures journalières maximales, minimales et médianes calculées avec le bassin versant naturel pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #59 et c.p. #71.....	78
FIGURE 3.4	Températures journalières maximales, minimales et médianes calculées avec le bassin versant naturel pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #92 et c.p. #96.....	79
FIGURE 3.5	Températures journalières maximales, minimales et médianes calculées après dérivation partielle des rivières aux Pékans et Carheil pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #3 et c.p. #4	80

FIGURE 3.6	Températures journalières maximales, minimales et médianes calculées après dérivation partielle des rivières aux Pékans et Carheil pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #26 et c.p. #46	81
FIGURE 3.7	Températures journalières maximales, minimales et médianes calculées après dérivation partielle des rivières aux Pékans et Carheil pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #59 et c.p. #71	82
FIGURE 3.8	Températures journalières maximales, minimales et médianes calculées après dérivation partielle des rivières aux Pékans et Carheil pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #92 et c.p. #96	83
FIGURE 3.9	Températures journalières maximales, minimales et médianes calculées après dérivation partielle des rivières aux Pékans et Carheil et débits réservés pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #3 et c.p. #4	84
FIGURE 3.10	Températures journalières maximales, minimales et médianes calculées après dérivation partielle des rivières aux Pékans et Carheil et débits réservés pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #26 et c.p. #46	85
FIGURE 3.11	Températures journalières maximales, minimales et médianes calculées après dérivation partielle des rivières aux Pékans et Carheil et débits réservés pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #59 et c.p. #71	86
FIGURE 3.12	Températures journalières maximales, minimales et médianes calculées après dérivation partielle des rivières aux Pékans et Carheil et débits réservés pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #92 et c.p. #96	87
FIGURE 3.13	Comparaison des températures journalières maximales, minimales et médianes calculées pour le bassin versant naturel et après dérivation partielle des rivières aux Pékans et Carheil pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #3 et c.p. #4	88

FIGURE 3.14	Comparaison des températures journalières maximales, minimales et médianes calculées pour le bassin versant naturel et après dérivation partielle des rivières aux Pékans et Carheil pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #26 et c.p. #46	89
FIGURE 3.15	Comparaison des températures journalières maximales, minimales et médianes calculées pour le bassin versant naturel et après dérivation partielle des rivières aux Pékans et Carheil pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #59 et c.p. #71	90
FIGURE 3.16	Comparaison des températures journalières maximales, minimales et médianes calculées pour le bassin versant naturel et après dérivation partielle des rivières aux Pékans et Carheil pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #92 et c.p. #96	91
FIGURE 3.17	Comparaison des températures journalières maximales, minimales et médianes calculées pour le bassin versant de la rivière Moisie après dérivation partielle des rivières aux Pékans et Carheil, avec et sans débit réservé, pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #3 et c.p. #4	92
FIGURE 3.18	Comparaison des températures journalières maximales, minimales et médianes calculées pour le bassin versant de la rivière Moisie après dérivation partielle des rivières aux Pékans et Carheil, avec et sans débit réservé, pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #26 et c.p. #46	93
FIGURE 3.19	Comparaison des températures journalières maximales, minimales et médianes calculées pour le bassin versant de la rivière Moisie après dérivation partielle des rivières aux Pékans et Carheil, avec et sans débit réservé, pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #59 et c.p. #71	94
FIGURE 3.20	Comparaison des températures journalières maximales, minimales et médianes calculées pour le bassin versant de la rivière Moisie après dérivation partielle des rivières aux Pékans et Carheil, avec et sans débit réservé, pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #92 et c.p. #96	95
FIGURE 3.21	Courbes des températures journalières classées pour le bassin versant naturel et aménagé pour tous les jours de l'année de la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #3 et c.p. #4	96

FIGURE 3.22	Courbes des températures journalières classées pour le bassin versant naturel et aménagé pour tous les jours de l'année de la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #26 et c.p. #46	97
FIGURE 3.23	Courbes des températures journalières classées pour le bassin versant naturel et aménagé pour tous les jours de l'année de la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #59 et c.p. #71	98
FIGURE 3.24	Courbes des températures journalières classées pour le bassin versant naturel et aménagé pour tous les jours de l'année de la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #92 et c.p. #96	99
FIGURE 3.25	Courbes des températures journalières classées pour le bassin versant naturel et aménagé du 1 ^{er} mai au 30 novembre pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #3 et c.p. #4	100
FIGURE 3.26	Courbes des températures journalières classées pour le bassin versant naturel et aménagé du 1 ^{er} mai au 30 novembre pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #26 et c.p. #46	101
FIGURE 3.27	Courbes des températures journalières classées pour le bassin versant naturel et aménagé du 1 ^{er} mai au 30 novembre pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #59 et c.p. #71	102
FIGURE 3.28	Courbes des températures journalières classées pour le bassin versant naturel et aménagé du 1 ^{er} mai au 30 novembre pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #92 et c.p. #96	103

LISTE DES ANNEXES

- ANNEXE A** Graphiques des températures de l'eau journalières au site: Moisie à la station 072301.
- ANNEXE B** Graphiques des températures de l'eau journalières au site: Moisie en aval de la rivière aux Pékans.
- ANNEXE C** Graphiques des températures de l'eau journalières au site: aux Pékans à la station 072302.

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Dans le cadre des études sur l'aménagement de la rivière Sainte-Marguerite la vice-présidence environnement de l'HYDRO-QUÉBEC a confié à l'INRS-Eau l'étude thermique de la rivière Moisie.

Le projet d'aménagement de la rivière Sainte-Marguerite prévoit le détournement partiel de deux tributaires de tête de la rivière Moisie, c'est-à-dire les rivières aux Pékans et Carheil. Les études environnementales menées à ce jour s'orientent vers une gestion multi-objective des eaux des rivières aux Pékans et Carheil. Cette gestion consiste à restituer vers la rivière Moisie, une partie de l'eau accumulée dans le réservoir aux Pékans-Carheil, pour atténuer les étiages artificiels et naturels sévères, préjudiciables aux saumons, aux activités de pêche et à la navigation.

La présente étude consiste à simuler le régime thermique de la rivière Moisie pour une longue période et à différents sites pour les cas suivants:

- a) pour le bassin versant naturel (conditions naturelles);
- b) pour le bassin versant de la rivière Sainte-Marguerite aménagé c'est-à-dire après le détournement des tributaires aux Pékans et Carheil (sans débit réservé);
- c) en tenant compte de la restitution, vers la Moisie d'une partie de l'eau accumulée dans le réservoir aux Pékans-Carheil (avec débits réservés).

Pour cette étude nous utilisons le modèle de simulation de la température de l'eau en rivière couplé au modèle hydrologique CEQUEAU. Le modèle Quantité-Qualité-CEQUEAU est un modèle de type déterministe. Il a été développé à l'INRS-Eau et la partie hydrologique (Morin et al., 1981) a été appliquée sur de nombreux bassins versants au Québec, en Europe et en Afrique. Le sous-modèle thermique a été appliqué sur trois bassins versants du Québec (Morin et al., 1983).

La modification du bassin versant et la nécessité d'estimer les températures de l'eau à plusieurs sites exigent la prise en compte des données physiographiques pour estimer le régime hydrologique du bassin versant pour des conditions naturelles ou modifiées. Le modèle Quantité-Qualité-CEQUEAU permet de prendre en compte les données physiographiques en subdivisant le bassin versant en éléments sur lesquels on estime les principales données physiographiques. Le découpage du bassin versant en éléments permet de simuler les débits et les températures de l'eau en n'importe quel point et de modifier les caractéristiques physiques du bassin versant pour simuler les effets de l'aménagement prévu.

L'utilisation de l'approche déterministe pour cette étude est justifiée par la complexité du régime thermique, par les modifications prévues sur le bassin versant et par le manque de données thermiques disponibles. L'approche déterministe, qui demande une connaissance des processus physiques, utilise principalement les données météorologiques qui sont facilement transposables sur le bassin versant naturel ou aménagé. Les mesures de températures de l'eau sont utilisées pour la calibration et la vérification du modèle. Par la suite, l'utilisation du modèle calibré et la disponibilité de longue série météorologique permettent de générer de longue série de températures de l'eau en rivière à n'importe quel point du bassin versant naturel ou aménagé.

L'étude comporte les étapes suivantes:

- formation d'une banque physiographique et de drainage pour le bassin versant naturel et après dérivation;
- formation des banques de données hydro-météorologiques et de température de l'eau en rivière;
- calibration et vérification du modèle hydrologique;
- calibration et vérification du modèle thermique;
- reconstitution par simulation des températures de l'eau de la rivière Moisie et ses principaux tributaires pour le bassin versant naturel;

- simulation des températures de l'eau de la rivière Moisie et ses principaux tributaires après dérivation partielle des rivières aux Pékans et Carheil;
- simulation des températures de l'eau de la rivière Moisie et ses principaux tributaires après dérivation partielle des rivières aux Pékans et Carheil mais en tenant compte de la restitution vers la rivière Moisie, d'une partie de l'eau accumulée dans le réservoir aux Pékans-Carheil.

CHAPITRE 1

MODÉLISATION DU RÉGIME HYDROLOGIQUE DE LA RIVIERE MOISIE NATUREL ET APRES DÉRIVATION

1.1 INTRODUCTION

L'application du modèle Quantité-Qualité-CEQUEAU pour simuler à l'aide du modèle thermique les températures de l'eau en rivière sur un bassin versant nécessite premièrement l'ajustement du modèle hydrologique (Morin et al., 1981) pour reproduire le mieux possible les débits observés.

La calibration du modèle hydrologique terminé, le modèle thermique peut être ajusté sur le bassin versant naturel. Par la suite les données physiographiques peuvent être modifiées pour tenir compte des aménagements prévus et le modèle Quantité-Qualité-CEQUEAU ajusté est utilisé pour simuler les débits et le régime thermique du bassin versant aménagé.

1.2 MODELE HYDROLOGIQUE CEQUEAU

Le modèle hydrologique CEQUEAU est un modèle qui prend en compte les caractéristiques physiques du bassin versant par le découpage de celui-ci en éléments de même dimension. Cette discrétisation spatiale du bassin versant permet de suivre l'évolution spatio-temporelle des phénomènes, de prévoir l'effet de toute modification physique du bassin versant et de prendre en compte les réservoirs réels ou fictifs. Enfin, le découpage du bassin versant facilite l'utilisation de la télédétection pour définir certaines caractéristiques physiographiques et estimer certaines variables telles que précipitation, couvert neigeux, etc.

1.2.1 Schématisation du bassin versant

Le découpage dans l'espace d'un bassin versant peut être très varié dans sa forme et sa densité. Pour le modèle CEQUEAU, nous avons retenu des surfaces carrées de dimensions semblables. En pratique, cela se traduit par la superposition d'une grille délimitant des éléments de surface que nous appellerons "carreaux entiers". La

dimension de chaque "carreau entier" dépend de la superficie du bassin versant étudié, de sa topographie et du nombre de stations météorologiques disponibles. On considère que pour un bassin versant relativement homogène, un découpage donnant de 25 à 75 carreaux entiers nous permet d'obtenir des résultats satisfaisants.

Pour chaque "carreau entier", on évaluera les caractéristiques physiographiques (altitude du coin sud-ouest, % forêt, % lac, % marais) qui sont nécessaires pour effectuer le bilan hydrologique.

Un deuxième découpage est ensuite nécessaire pour reproduire le cheminement de l'eau dans les rivières. Ceci est fait en subdivisant chaque "carreau entier" en "carreaux partiels" à l'aide des lignes de partage des eaux des sous-bassins. La seule caractéristique physique liée au "carreau partiel" est sa superficie exprimée en pourcentage du "carreau entier" et le sens de l'écoulement.

Ce second découpage permet de:

- suivre dans l'espace et le temps la formation et l'évolution des écoulements;
- introduire toute modification artificielle de l'écoulement dans les cours d'eau;
- fournir les débits à n'importe quel point du réseau de drainage.

1.2.2 Données météorologiques

En plus des données physiographiques des carreaux entiers, le modèle requiert sur chacun de ces carreaux, à un pas de temps journalier, les données suivantes:

- la précipitation liquide;
- la précipitation solide;
- la température maximale de l'air;
- la température minimale de l'air.

Ces données n'étant disponibles qu'à un nombre limité de stations, le modèle permet différentes options d'interpolation, qui sont la régression, la pondération et le polygone de Thiessen.

1.2.3 Modèle

Le modèle CEQUEAU comporte deux parties principales visant à décrire le mieux possible le cheminement de l'eau vers l'exutoire du bassin versant.

La première partie, qu'on appelle "fonction de production", concerne l'écoulement vertical de l'eau et a pour but d'effectuer sur chaque carreau entier le bilan de l'eau dans le sol, les lacs et marais.

La seconde partie, qu'on appelle "fonction de transfert", concerne l'écoulement dans le réseau de drainage et a pour but d'effectuer sur chaque carreau partiel le transfert de l'eau en rivière et de tenir compte, s'il y a lieu, des ouvrages de régularisation.

Fonction de production

La fonction de production a pour but de représenter de manière simple, mais réaliste, les différentes voies que suivra l'eau atmosphérique entre le moment où elle atteint le sol et celui où elle rejoint la rivière. L'origine de l'alimentation en eau atmosphérique du bassin versant est la pluie ou la neige.

Quelle que soit l'origine de l'eau atmosphérique entrant dans un carreau avant sa mise en disponibilité pour l'écoulement vers l'exutoire, elle sera soumise à divers processus qui auront une influence directe sur la formation de l'onde d'écoulement.

Ces processus sont schématisés dans le modèle CEQUEAU par la représentation du sol sous forme de réservoirs communiquant entre eux à l'aide de relations mathématiques reproduisant, à l'échelle journalière, les différents transferts de masse (figure 1.1).

La première étape de la fonction de production dans le modèle CEQUEAU consiste à calculer la hauteur d'eau disponible, au niveau du sol, sur chaque carreau entier. Cette eau peut avoir deux origines: l'eau de pluie ou l'eau provenant de la fusion du manteau nival.

Comme nous l'avons vu précédemment, l'eau de pluie disponible sur chaque carreau entier est obtenue directement par interpolation des précipitations liquides mesurées aux stations météorologiques de la région.

Pour calculer l'eau provenant de la fusion du manteau nival, le modèle effectue le bilan des stocks de neige sur chaque carreau entier, séparé en deux parties: une zone de forêt et une zone de clairière. Le bilan de la fonte est fait séparément sur chaque partie et la lame de fonte globale est la combinaison des deux lames produites, en forêt et en clairière, pondérées en fonction des surfaces respectives de chaque zone.

Les équations de base du calcul de la fonte sont tirées du rapport "Runoff from Snowmelt" du corps d'ingénieurs de l'armée américaine et utilisent une méthode simple de degré-jour qui permet d'estimer la fonte. On tient compte de deux phénomènes principaux qui retardent la disponibilité immédiate de l'eau de fonte, soit: le réchauffement du manteau nival qui a une faible conductivité thermique et le mûrissement du stock de neige pour que la lame de fonte qui se crée en surface puisse atteindre le niveau du sol.

Connaissant la fonte, on peut calculer l'eau disponible au niveau du sol en additionnant la précipitation liquide et la fonte.

S'il y a des surfaces imperméables sur le carreau entier, il y a du ruissellement qui est immédiatement disponible pour l'écoulement en rivière.

La lame restante est ajoutée au contenu antérieur du réservoir SOL. Le niveau d'eau dans le réservoir SOL est utilisé pour déterminer l'évaporation, l'infiltration et les évacuations qui reproduisent le ruissellement de surface et le ruissellement retardé.

La méthode utilisée pour le calcul de l'évaporation journalière est celle de Thornwaite modifiée pour tenir compte de la durée potentielle d'ensoleillement en fonction de la latitude et du jour de l'année et de la saturation du sol.

Les évacuations sont déterminées en fonction des coefficients de vidange et des hauteurs de chaque orifice. Ces évacuations sont additionnées au ruissellement sur les surfaces imperméables pour donner un volume d'eau disponible pour l'écoulement en rivière, sauf la partie infiltration qui s'écoule dans le réservoir NAPPE.

Les écoulements issus du réservoir NAPPE dépendent du niveau d'eau dans le réservoir, des coefficients de vidange et de la hauteur de chaque orifice. Ces coefficients sont généralement très faibles puisque le réservoir NAPPE a pour but de reproduire les étiages.

Ceci complète les termes du bilan de l'eau sur la partie terrestre. Le bilan en eau sur la partie eau libre s'évalue à l'aide du réservoir LACS et MARÉCAGES. Les écoulements issus de ce réservoir dépendent du niveau d'eau, de l'apport qui est la précipitation ajoutée à la fonte, de l'évaporation, du coefficient de vidange et de la hauteur de l'orifice.

La hauteur et les coefficients de vidange de chaque orifice sont fixés à l'aide des cartes de données du modèle. Le calage du modèle a pour but de déterminer les valeurs de ces paramètres pour reproduire le mieux possible les débits mesurés.

Fonction de transfert

La fonction de production, qui vient d'être décrite, aboutit à l'obtention d'un volume d'eau disponible pour le transfert en rivière. Ce transfert est effectué de carreau partiel à carreau partiel.

Le volume d'eau disponible sur chaque carreau partiel est obtenu en multipliant le volume d'eau produit sur le carreau entier par le pourcentage de superficie du carreau

partiel considéré. Ce volume est ajouté aux volumes entrant dans ce carreau depuis le ou les carreaux partiels directement en amont. Le volume résultant devient le volume disponible pour le transfert vers le carreau immédiatement en aval. La figure 1.2 montre la schématisation de la fonction de transfert.

Le volume V_i étant le volume emmagasiné dans le carreau partiel i , il se vidangera dans le carreau partiel immédiatement en aval d'une quantité v_i proportionnelle, d'une part, au volume V_i et, d'autre part, à un coefficient de transfert propre au carreau partiel i .

Le coefficient de transfert de chaque carreau partiel est relié aux caractéristiques hydrauliques prépondérantes de l'écoulement, à savoir la capacité d'amortir l'onde par emmagasinement dans le réseau. Un bon index de cette capacité d'amortissement sur un carreau partiel est la superficie d'eau libre sur ce carreau. Un grand lac, par exemple, amortit l'écoulement: cependant, son influence dépend également de la superficie du bassin versant en amont. Un lac de 10 km², par exemple, a peu d'influence sur l'onde de crue d'un bassin versant de 5 000 km². Par contre, si le bassin versant est de 100 km², ce lac devient très important. Le modèle CEQUEAU calcule le coefficient de transfert de chaque carreau partiel en considérant la superficie couverte d'eau sur le carreau partiel et la superficie en amont de ce carreau à l'aide de l'équation suivante:

$$XKT_i = 1 - \exp \left\{ \frac{EXXKT \times SA_i}{SL_i} \times \frac{100}{CEKM2} \right\}$$

- où XKT_i : coefficient de transfert du carreau partiel i pour le pas de temps d'une journée;
- $EXXKT$: paramètre d'ajustement du coefficient de transfert, la valeur de ce paramètre étant déterminé par essai et erreur lors du calage du modèle;
- SA_i : superficie (km²) du bassin versant en amont du carreau SL_i : superficie (km²) d'eau sur le carreau partiel i ;
- $CEKM2$: superficie (km²) des carreaux entiers.

Compte tenu que cette méthode de transfert peut être erronée pour des carreaux partiels particuliers (un grand lac ou encore une section en travers particulière), le

modèle permet une solution plus rigoureuse qui consiste à introduire, d'une part, la courbe d'emmagasinement en fonction de la cote et, d'autre part, la loi de vidange de l'exutoire. Le modèle permet également de prendre en considération des barrages existants ou prévus en introduisant les principales caractéristiques des retenues et le mode d'exploitation.

1.2.4 Calage du modèle

L'application d'un modèle paramétrique à un bassin versant nécessite l'ajustement des paramètres et constantes afin que le modèle reproduise le mieux possible les débits observés; cette opération est appelée "calage du modèle".

Les paramètres et constantes utilisés par le modèle CEQUEAU (tableau 1.1) peuvent être groupés suivant les différentes parties du cycle hydrologique dans lesquelles ils interviennent. Ces paramètres sont de trois types différents selon qu'ils sont déterminés par essai ou erreur, par la physique du phénomène ou considérés comme constantes déterminées à l'aide des caractéristiques hydrologiques et physiographiques.

Notons que la schématisation du sol sous forme de différents réservoirs est conçue de façon à permettre la simulation de régime hydrologique très différente. Toutefois, si le régime est simple, on peut alléger cette schématisation en n'utilisant pas certains orifices. Ceci limite le nombre de paramètres et facilite le calage.

L'ajustement des paramètres se fait normalement par essai et erreur, ou par optimisation. La méthode essai et erreur consiste à analyser les résultats des simulations précédentes et modifier les paramètres pour améliorer les résultats; ceci est répété jusqu'à ce que les débits simulés soient comparables aux débits observés. Par optimisation un programme détermine automatiquement les valeurs des paramètres de façon à minimiser les différences entre les débits observés et calculés.

L'évaluation de la qualité des résultats d'une simulation consiste à vérifier si chacune des caractéristiques des écoulements observés est bien reproduite. Dans le modèle

CEQUEAU, une approche semi-objective a été retenue. Le modèle fournit une série de tableaux et de graphiques présentant les débits observés et calculés à partir desquels on effectue les comparaisons entre les différents essais de simulation. La validité du calage est évaluée à partir de la comparaison des éléments suivants:

- les débits moyens annuels et mensuels observés et calculés;
- le synchronisme des débits observés et calculés;
- les crues observées et calculées (débits de pointe, volumes, formes);
- les étiages observés et calculés.

Le modèle calcul égale des critères numériques annuels pour juger d'une façon objective de la qualité des simulations. Les critères calculés par le modèle sont:

- le coefficient de corrélation, défini par:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (q_{ci} - \bar{q}_c) (q_{oi} - \bar{q}_o)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (q_{ci} - \bar{q}_c)^2 \sum_{i=1}^n (q_{oi} - \bar{q}_o)^2}}$$

où q_{ci} et q_{oi} : débits calculé et observé du jour i ;

\bar{q}_c et \bar{q}_o : moyennes respectives de q_{ci} et q_{oi} sur les n jours servant au calcul du coefficient.

- le coefficient de Nash, (Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V., 1970) défini par:

$$N = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (q_{ci} - q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (q_{oi} - \bar{q}_{oi})^2}$$

Le coefficient de Nash représente le rapport de la variance résiduelle à la variance des débits observés. Il vaut 1 lorsque les débits simulés q_{ci} sont identiques aux débits

observés q_{oi} . A mesure que la différence entre les débits observés et calculés s'accroît, le coefficient décroît et peut même devenir négatif.

1.3 APPLICATION DU MODELE CEQUEAU AU BASSIN VERSANT NATUREL DE LA RIVIERE MOISIE

La rivière Moisie est située sur la basse Côte-Nord et se jette dans le Saint-Laurent près de Sept-Iles. Le bassin versant naturel a une superficie de 19 248 km² et est orienté nord-sud.

1.3.1 Banque de données physiographiques et de drainage

Le bassin versant de la rivière Moisie a été schématisé à l'aide d'une grille à basse carrée de 20 km par 20 km. La dimension de la maille élémentaire est justifiée par la densité du réseau météorologique disponible pour la région et par la superficie et la topographie du bassin versant.

La figure 1.3 montre la schématisation du bassin versant naturel de la rivière Moisie. Les caractéristiques physiographiques, pourcentage de forêt, de lac et marais, l'altitude de chaque "carreau entier" et les données de drainage de chaque "carreau partiel" ont été extraites à partir des cartes topographiques au 1:250 000.

Les données physiographiques des rivières, largeur-pente-longueur, ont été extraites des documents préparés par la firme Groupe Environnement Shoener Inc. à partir de photos aériennes.

Pour faciliter la visualisation de la Moisie et de ses principaux tributaires, la figure 1.4 montre les principaux cours d'eau du bassin versant avec la schématisation utilisée par le modèle CEQUEAU.

1.3.2 Données hydro-météorologiques

La mise en opération du modèle hydrologique CEQUEAU nécessite l'utilisation des données météorologiques journalières disponibles sur le bassin versant. Le tableau 1.2 donne la liste des stations météorologiques en service ou ayant existé et la période d'observation disponible. Ces données proviennent du Service de l'environnement atmosphérique d'Environnement Canada. La position de ces stations par rapport au bassin versant étudié est montrée à la figure 1.3. Compte tenu de la position des stations et des manques de données pour quelque station pour la période 1961 à 1989, nous avons décidé d'utiliser pour cette étude les stations Sept-Iles et Wabush seulement. Ce choix est justifié par la longue période concomitante de données disponibles à ces deux stations, par leur position par rapport au bassin versant, Sept-Iles au sud et Wabush complètement au nord. De plus, l'ajustement des paramètres du modèle est valable pour le réseau météorologique utilisé et toute modification importante du réseau nécessite un réajustement des paramètres.

Les données météorologiques utilisées sont les températures maximum et minimum, les précipitations liquides et les précipitations solides. Pour la précipitation solide, nous avons utilisé la quantité de neige tombée au sol avec une densité de 0,10.

Le tableau 1.2 montre également la période où les données hydrométriques mesurées sont disponibles. La station 072301 située en aval sur la rivière Moisie a un bassin versant naturel de 19 084 km². La station 072302 est située sur la rivière aux Pékans et a un bassin versant naturel de 3 390 km². La position de ces deux stations est montrée à la figure 1.3.

1.3.3 Ajustement des paramètres du modèle hydrologique

L'ajustement des paramètres a été fait par essai et erreur pour une première approximation en utilisant les débits observés aux stations 072301 et 072302 pour la période 1976 à 1978. Cet ajustement a pour but d'estimer les paramètres non déterminés par la physique du phénomène c'est-à-dire les paramètres du type (a) tel

que définit au tableau 1.1. Si les premiers essais permettent d'obtenir rapidement des simulations satisfaisantes, les améliorations ultérieures peuvent n'être que locales, c'est-à-dire qu'une crue mieux représentée pour une certaine valeur d'un paramètre peut l'être au détriment d'une autre et réciproquement. A ce point de l'ajustement, il est nécessaire d'utiliser des critères numériques pour s'assurer que les modifications de paramètres améliorent l'ensemble des simulations. On utilise normalement le critère de Nash ou la somme des différences aux carrés entre les débits observés et calculés.

L'ajustement final des paramètres a été fait par optimisation en utilisant la période 1976 à 1985. Nous avons optimisé en minimisant la somme des différences aux carrés entre les débits observés et les débits calculés. Seuls les débits de la station 072301 ont été utilisés. L'utilisation d'une longue période, 10 ans, a pour but de minimiser l'influence d'une année particulière sur la valeur des paramètres.

Le tableau 1.3 montre les valeurs finales des paramètres du modèle hydrologique CEQUEAU ajusté au bassin versant de la rivière Moisie.

1.3.4 Résultats des simulations hydrologiques

Les résultats des simulations, pour la période de calibration (1976-1985) et la période de vérification, sont présentés au tableau 1.4. Ce tableau donne les valeurs des coefficients de Nash et de corrélation calculés annuellement à la station 072301 sur la rivière Moisie et à la station 072302 sur la rivière aux Pékans. Les lames annuelles observées et calculées sur les bassins versants de la rivière Moisie et de la rivière aux Pékans sont également montrées sur le tableau 1.4.

L'étude du tableau 1.4 et en particulier les valeurs du coefficient de Nash montrent que les résultats obtenus sur le bassin versant de la rivière aux Pékans, station 072302, sont aussi précis que ceux obtenus sur la rivière Moisie même si les données de la rivière aux Pékans n'ont pas été utilisées pour l'optimisation des paramètres. Les coefficients de Nash pour les années de vérification, 1966 à 1975 et 1986 à 1989 sont légèrement inférieurs à ceux de la période de calibration, 1976 à 1985. Pour la période de

vérification, on obtient quand même plusieurs années avec des coefficients de Nash supérieurs à 0,90.

Les périodes où les débits ont été mesurés, 1966 à 1989 pour la station 072301 et 1966 à 1981 pour la station 072302 ont été utilisées pour faire une analyse sommaire des débits simulés par rapport aux débits observés. L'analyse a pour but de vérifier si les débits simulés présentent une erreur systématique en étant sur ou sous estimé d'une façon générale. L'analyse a été faite sur les débits journaliers, les débits moyens mensuels et sur les débits journaliers maximums.

Les graphiques des figures 1.5 à 1.10 sont utilisés pour montrer les résultats. Les courbes de débits observés et calculés classés, figures 1.5 et 1.6 montrent une bonne similitude entre les débits observés et calculés aux stations 072301 et 072302. Les figures 1.7 et 1.8 montrent les débits moyens mensuels observés et calculés pour la rivière Moisie à la station 072301 et pour la rivière aux Pékans station 072302. Ces figures montrent que les débits moyens mensuels n'ont pas d'erreur systématique parce qu'ils se situent de part et d'autre de la droite à 45°. Les figures 1.9 et 1.10 utilisent la même représentation pour montrer les débits maximums journaliers observés et calculés pour chaque mois. Bien que la dispersion des débits journaliers maximums mensuels soit un peu plus grande que la dispersion observée sur les débits moyens mensuels, les valeurs calculées ne présentent pas d'erreur systématique.

L'analyse de tous ces résultats montre que le modèle hydrologique CEQUEAU tel qu'ajusté permet de bien reproduire les débits de la rivière Moisie et de ses tributaires, à partir des données météorologiques des stations Sept-Iles et Wabush.

1.4 APPLICATION DU MODELE CEQUEAU AU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE MOISIE APRES DÉRIVATION D'UNE PARTIE DES RIVIERES AUX PÉKANS ET CARHEIL

Les paramètres du modèle CEQUEAU ajustés pour le bassin versant naturel de la rivière Moisie peuvent être utilisés pour estimer les débits à n'importe quel point du bassin

avant ou après dérivation des rivières kansékans et Carheil en modifiant adéquatement les banques de données physiographiques et de drainage pour tenir compte des aménagements prévus et de leur mode de gestion, comme une restitution d'une certaine quantité d'eau à certaine période.

1.4.1 Banque de données physiographiques et de drainage de la rivière Moisie après dérivation

Le bassin versant de la rivière Moisie après dérivation a été schématisé de la même façon que le bassin versant naturel en utilisant une grille à basse carrée de 20 km par 20 km.

La figure 1.11 montre la schématisation du bassin versant de la rivière Moisie après dérivation d'une partie des bassins des rivières kansékans et Carheil.

1.4.2 Simulation d'une longue série hydrologique

Les données météorologiques (précipitations et température de l'air) étant disponibles de 1961 à 1989 aux stations de Sept-Iles et Wabush, on peut avec le modèle simuler une longue série de débits à différents points du bassin versant naturel et après dérivation. La figure 1.12 montre les débits journaliers classés à la station 072302 sur la rivière aux-Pékans calculés pour le bassin versant naturel et après dérivation. Comme on le voit sur la figure les débits après dérivation sont beaucoup plus faibles, ce qui est normal puisque le bassin versant passe de 3 390 km² à 889 km². La figure 1.13 montre les débits classés calculés à une station fictive située sur la rivière Moisie immédiatement en aval de la rivière aux-Pékans. La figure 1.14 montre également les débits journaliers classés calculés pour le bassin versant naturel et après dérivation, pour la rivière Moisie à la station 072301.

TABLEAU 1.1 Paramètres et constantes intervenant dans le modèle CEQUEAU.

Douze paramètres des réservoirs SOL-NAPPE-MARAIS:

CIN	(a)	coefficient d'infiltration du réservoir SOL au réservoir NAPPE
CVMAR	(a)	coefficient de vidange du réservoir LACS et MARAIS
CVNB	(a)	coefficient de vidange du réservoir NAPPE (vidange basse)
CVNH	(a)	coefficient de vidange du réservoir NAPPE (vidange haute)
CVSB	(a)	coefficient de vidange du réservoir SOL (vidange basse)
CVSI	(a)	coefficient de vidange du réservoir SOL (vidange intermédiaire)
HINF	(a)	seuil d'infiltration vers le réservoir NAPPE
HINT	(a)	seuil de vidange intermédiaire du réservoir SOL
HMAR	(a)	seuil de vidange du réservoir LACS et MARAIS
HNAP	(a)	seuil de vidange haute du réservoir NAPPE
HRIMP	(a)	hauteur de précipitation pour qu'il y ait ruissellement sur des surfaces imperméables
HSOL	(a)	hauteur du réservoir SOL

Sept paramètres régissant la fonte de neige:

STRNE	(b)	seuil de transformation pluie-neige
TFC	(b)	taux de fonte en forêt
TFD	(b)	taux de fonte en clairière
TSC	(b)	seuil de température de fonte en forêt
TSD	(b)	seuil de température de fonte en clairière
TTD	(b)	coefficient de déficit calorifique de la neige
TTS	(b)	seuil de mûrissement du stock de neige

Quatre paramètres qui gouvernent l'évapotranspiration:

EVNAP	(a)	pourcentage d'évapotranspiration pris dans le réservoir NAPPE
HPOT	(a)	seuil de prélèvement de l'eau à taux potentiel
XAA	(b)	exposant de la formule de Thornwaite
XIT	(b)	valeur de l'index thermique de Thornwaite

Un paramètre et une constante du transfert:

EXXKT	(a)	paramètre d'ajustement du coefficient de transfert
ZN	(c)	temps de concentration du bassin

Divers paramètres et constantes:

COET	(b)	coefficient de correction des températures avec l'altitude
COEP	(b)	coefficient de correction des précipitations avec l'altitude
FACT	(a)	facteur modifiant les précipitations moyennes sur un ensemble de carreaux entiers
JOEVA	(a)	variables décalant la date d'insolation potentielle maximale
JONEI	(b)	respectivement pour l'évapotranspiration et pour la neige
XINFMA	(b)	infiltration maximale par jour
XLA	(c)	latitude moyenne du bassin versant
TRI	(c)	pourcentage de surface imperméable

(a): paramètre déterminé par essai et erreur.

(b): paramètre déterminé selon la physique du phénomène.

(c): constante déterminée à l'aide des caractéristiques hydrologiques et physiographiques du bassin versant.

TABLEAU 1.2 Données météorologiques et hydrométriques disponibles dans la région de la rivière Moisie.

Station	Année																													
	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	
	Météo																													
Sept-Iles* 7047910																														
Matamek 704DFLR																														
Gagnon 7042590																														
Poste Montagnais 7046212																														
Fermont 704CB70																														
Wabush 8504175																														
	Débit																													
Moisie 072301 19000 km ²																														
aux Pékans 072302 3390 km ²																														

* Les données de Sept-Iles sont disponibles à partir de 1945.
 -- Manque de données.

TABLEAU 1.3 Valeurs finales des paramètres du modèle CEQUEAU ajusté au bassin versant de la rivière Moisie.

Douze paramètres des réservoirs SOL-NAPPE-MARAIS:

CIN = 0.2930
 CVMAR = 0.0050
 CVNB = 0.0003
 CVNH = 0.0152
 CVSB = 0.0000
 CVSI = 0.2950
 HINF = 61.5000 mm
 HINT = 59.9000 mm
 HMAR = 250.0000 mm
 HNAP = 499.0000 mm
 HRIMP = 2.7000 mm
 HSOL = 100.teur du réservoir SOL

Sept paramètres régissant la fonte de neige:

STRNE = 0.50 C
 TFC = 3.32 mm/ C
 TFD = 4.99 mm/ C
 TSC = 0.40 C
 TSD = -0.90 C
 TTD = 0.70
 TTS = -1.60 C

Quatre paramètres qui gouvernent l'évapotranspiration:

EVNAP = 18.700 %
 HPOT = 73.500 mm
 XAA = 0.734
 XIT = 18.400

Un paramètre et une constante du transfert:

EXXKT = 0.0290 (transfert aval-amont) NPJO = 9 carreaux/jour
 ZN = 3.0000 jours

Divers paramètres et constantes:

COET = 00.00
 COEP = 00.00
 FACT = 0.00
 JOEVA = 80.00
 JONEI = 80.00
 XINFMA = 15.00 mm/jour
 XLA = 5145
 TRI = 12.80 %
 NTHIES=NTEMP = 3 (pondération des données météo)
 TRI = 12.80 %

TABLEAU 1.4 Critère numérique annuel pour la période de calibration et de vérification.

Station	72301				72302			
	Critère		Lame		Critère		Lame	
	Année	Nash	Corr	Observée mm	Calculée mm	Nash	Corr	Observée mm
1966	0,87	0,94	880,95	833,52	0,84	0,94	878,46	751,06
1967	**	**	**	**	0,77	0,88	709,00	679,84
1968	0,77	0,94	739,28	750,31	0,84	0,93	697,51	654,98
1969	0,85	0,97	830,50	972,64	0,90	0,97	816,67	893,45
1970	0,93	0,96	830,38	804,16	0,90	0,96	682,12	729,08
1971	0,94	0,97	733,04	687,94	0,94	0,97	700,19	669,81
1972	0,90	0,96	791,14	848,06	0,75	0,92	636,35	777,41
1973	0,92	0,96	730,72	750,28	0,91	0,96	665,91	695,28
1974	0,94	0,97	692,88	730,14	0,92	0,97	546,77	638,83
1975	0,96	0,98	680,45	662,72	0,88	0,97	595,52	615,10
1976*	0,92	0,84	846,03	802,30	0,71	0,89	677,46	756,07
1977*	0,90	0,96	760,82	742,16	0,94	0,98	766,65	767,39
1978*	0,90	0,96	731,73	659,76	0,84	0,92	690,36	676,79
1979*	0,86	0,93	896,55	866,29	0,94	0,97	846,37	816,52
1980*	0,91	0,96	670,22	694,97	0,90	0,95	591,95	625,41
1981*	0,94	0,97	811,79	806,74	0,93	0,97	674,33	707,85
1982*	0,90	0,96	660,90	717,88	**	**	**	**
1983*	0,92	0,96	843,72	828,01	**	**	**	**
1984*	0,92	0,98	662,36	753,02	**	**	**	**
1985*	0,91	0,96	561,83	591,54	**	**	**	**
1986	0,90	0,96	589,38	600,85	**	**	**	**
1987	0,62	0,83	613,78	598,56	**	**	**	**
1988	0,81	0,92	615,52	627,28	**	**	**	**
1989	0,79	0,89	508,92	565,18	**	**	**	**

* Période utilisée pour l'optimisation des paramètres. Seules les données de la station 072301 ont été utilisées.

** Données hydrométriques observées non disponibles.

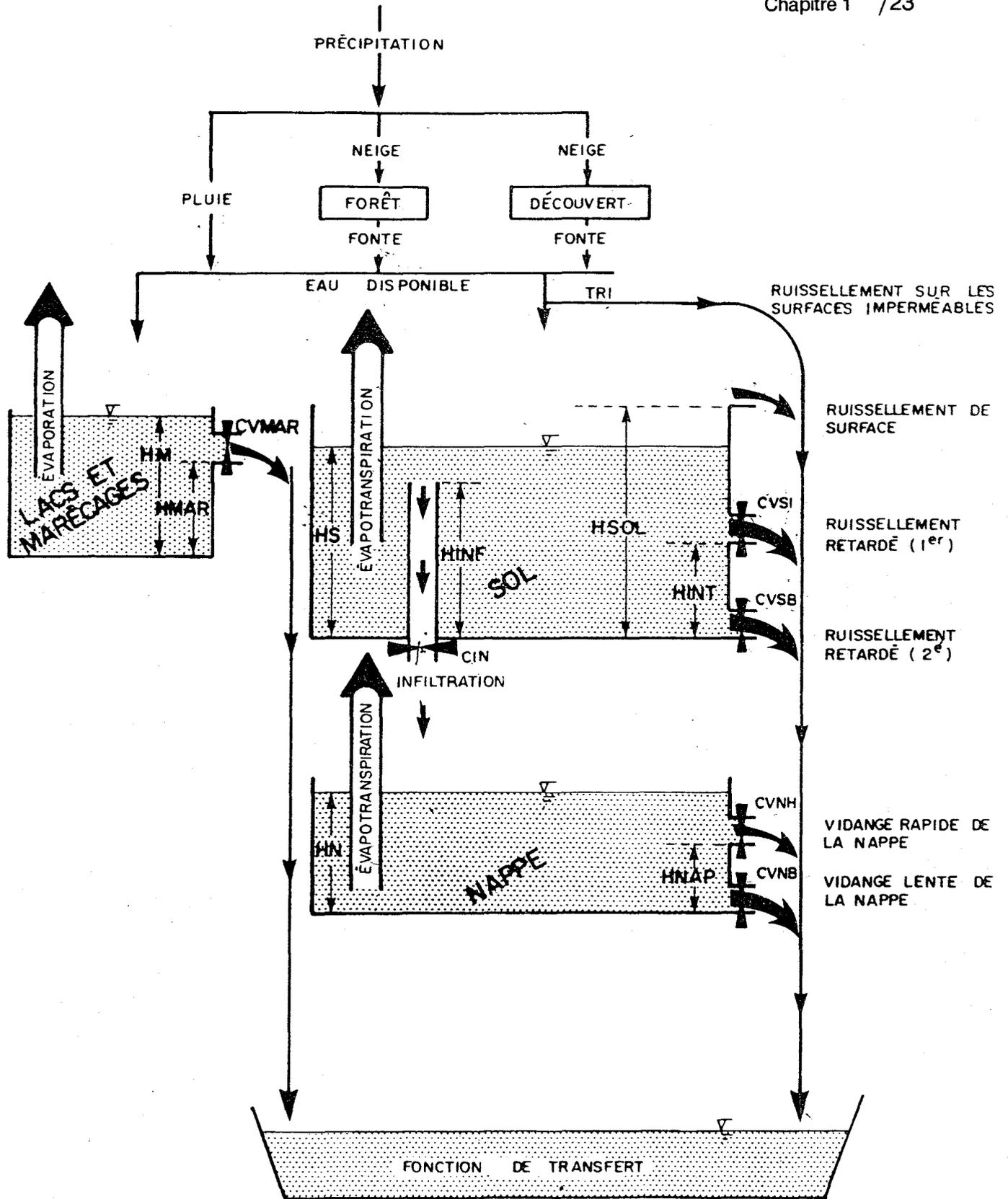


FIGURE 1.1 Schéma de production du modèle CEQUEAU.

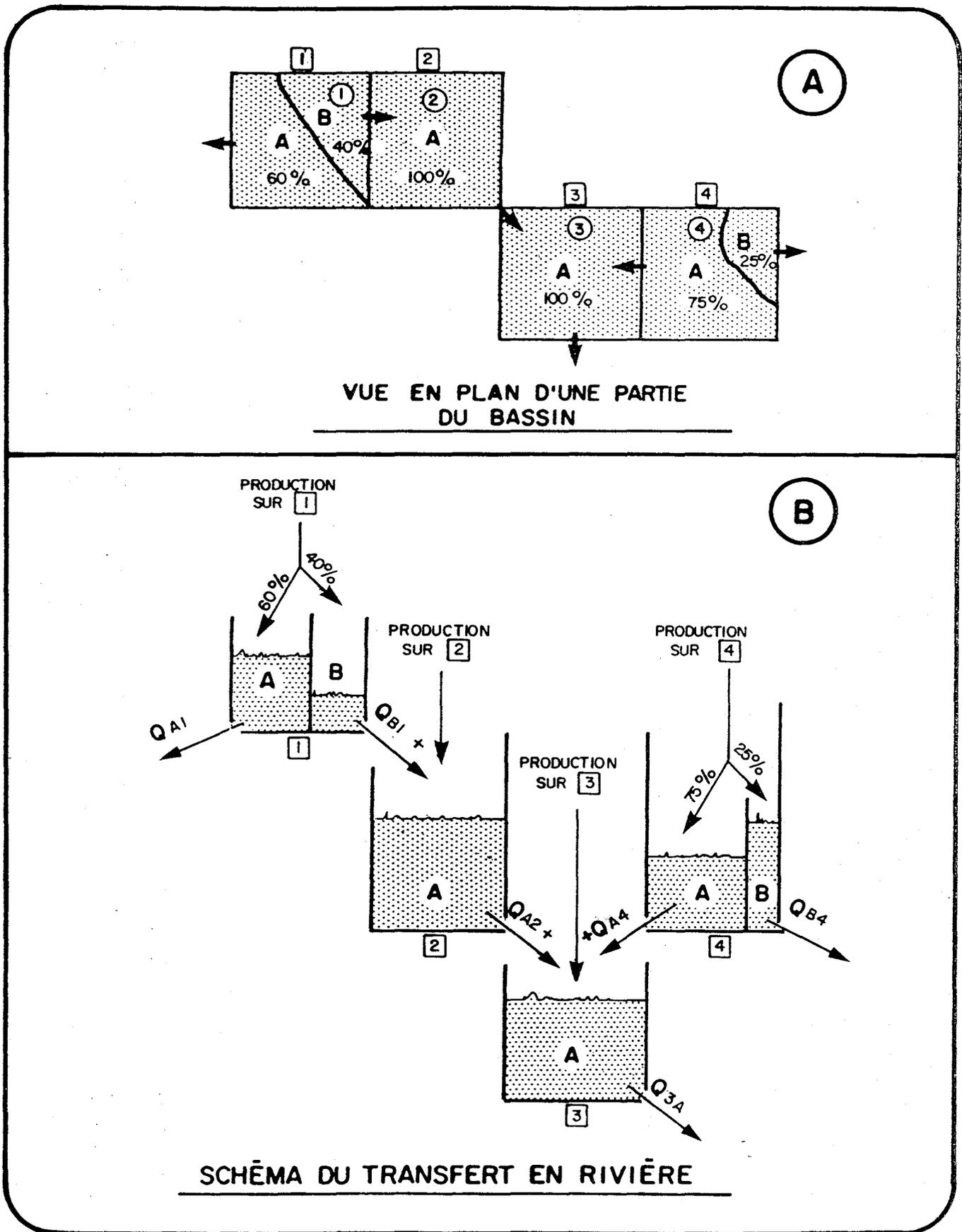


FIGURE 1.2 Schématisation de la fonction de transfert.

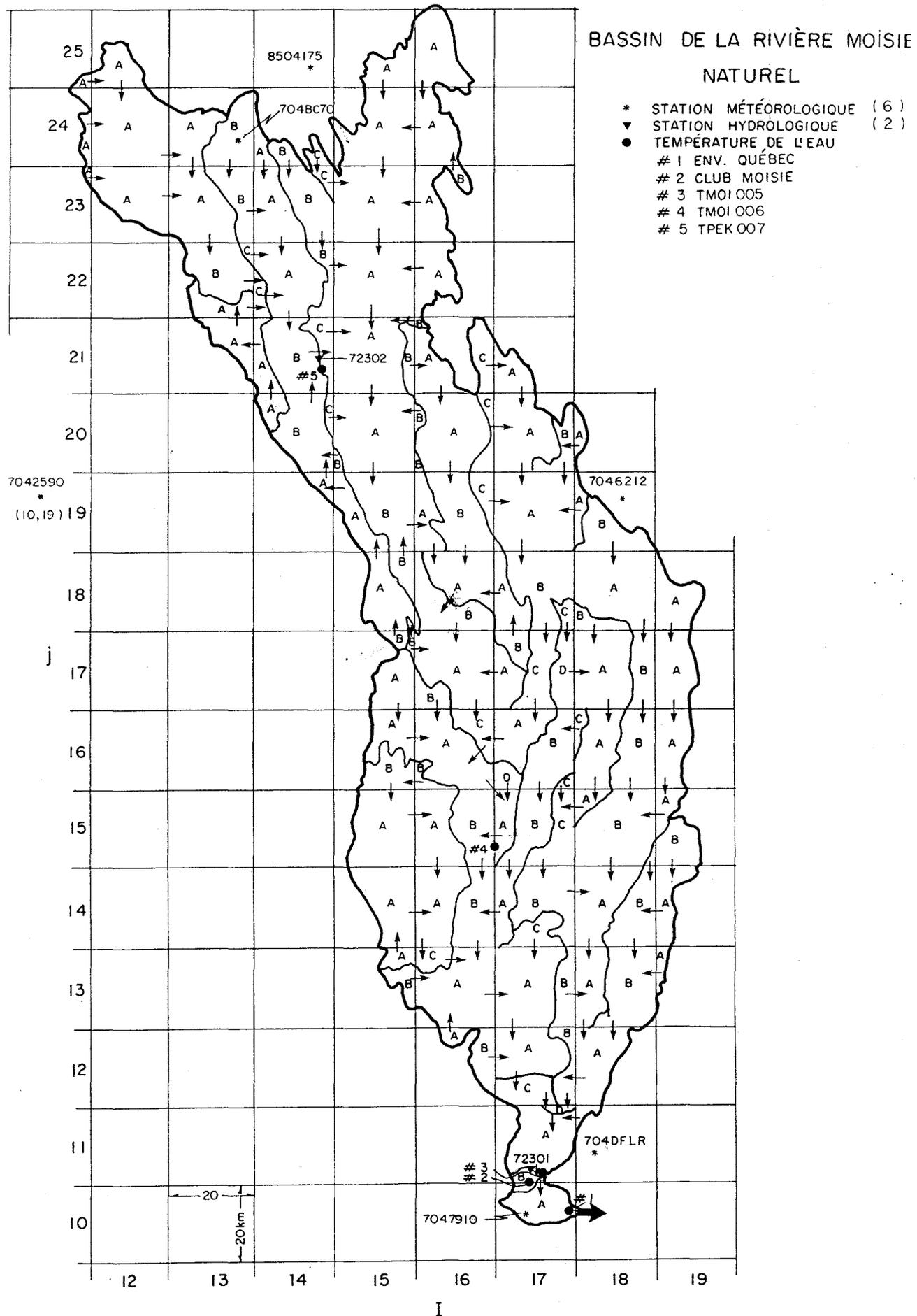


FIGURE 1.3 Schématisation du bassin versant naturel de la rivière Moisie.

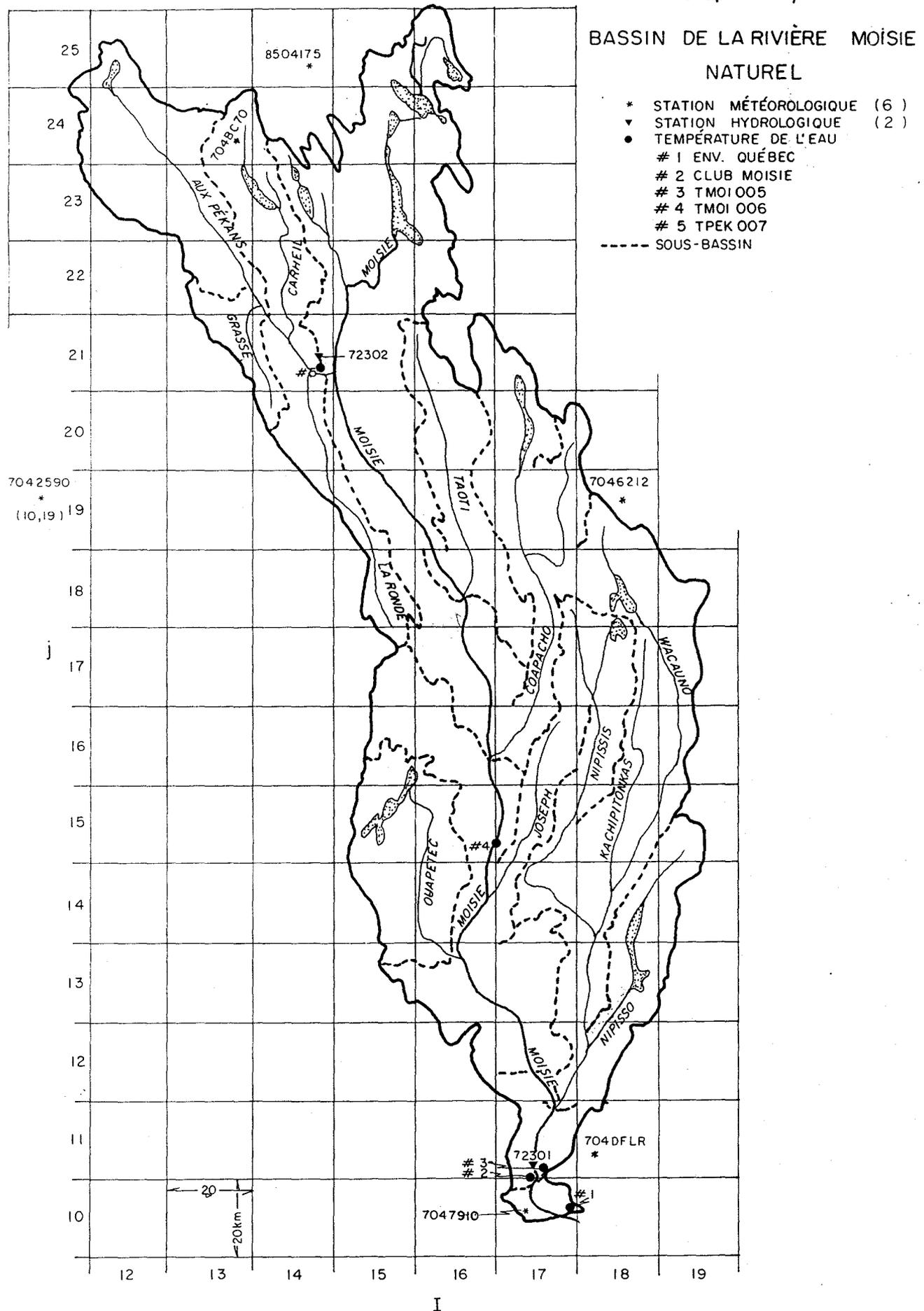


FIGURE 1.4 Emplacement de la rivière Moisie et ses principaux tributaires par rapport à la schématisation utilisée par le modèle CEQUEAU.

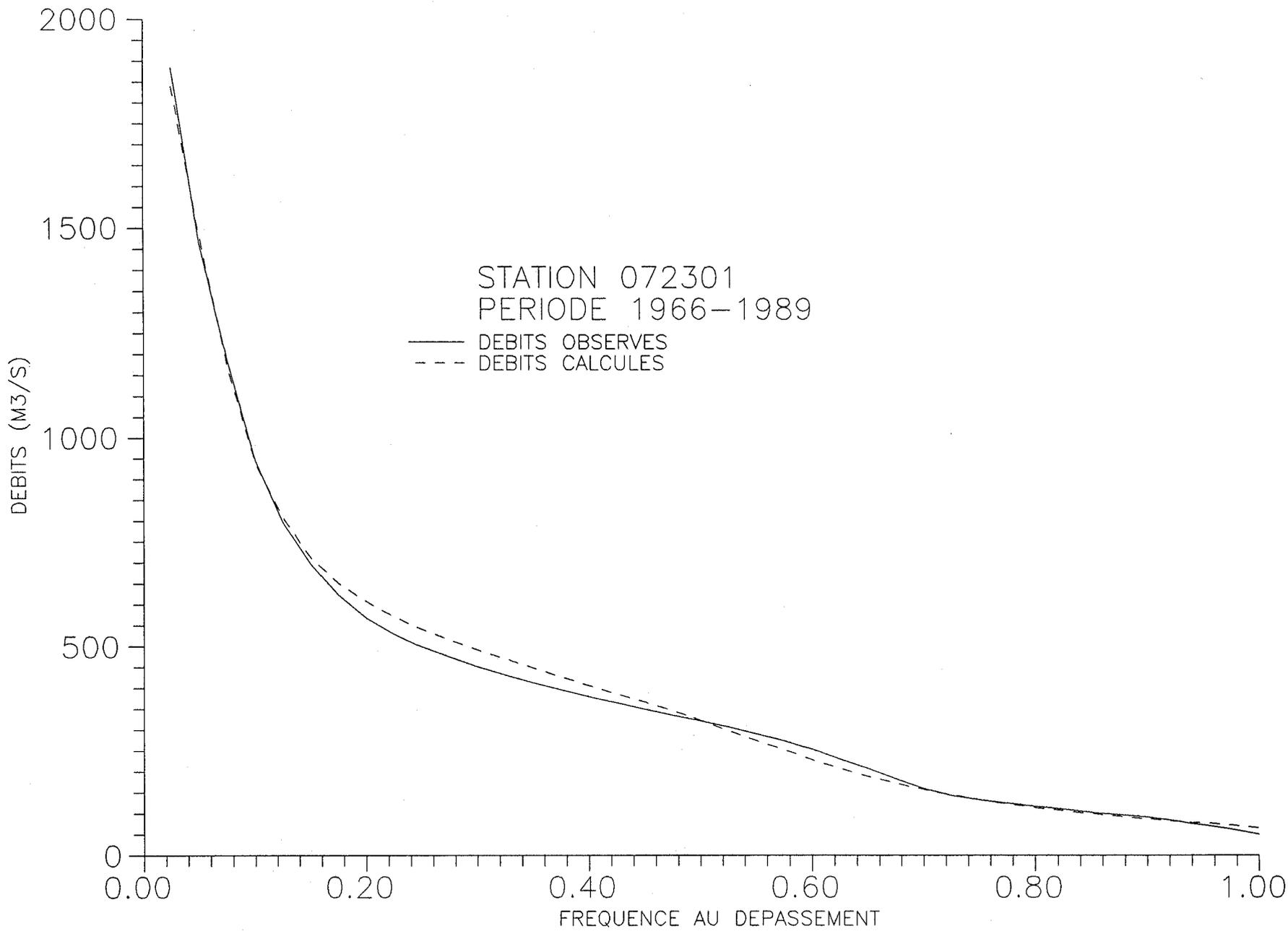


FIGURE 1.5 Débits journaliers, observés et calculés, classés, station 072301.

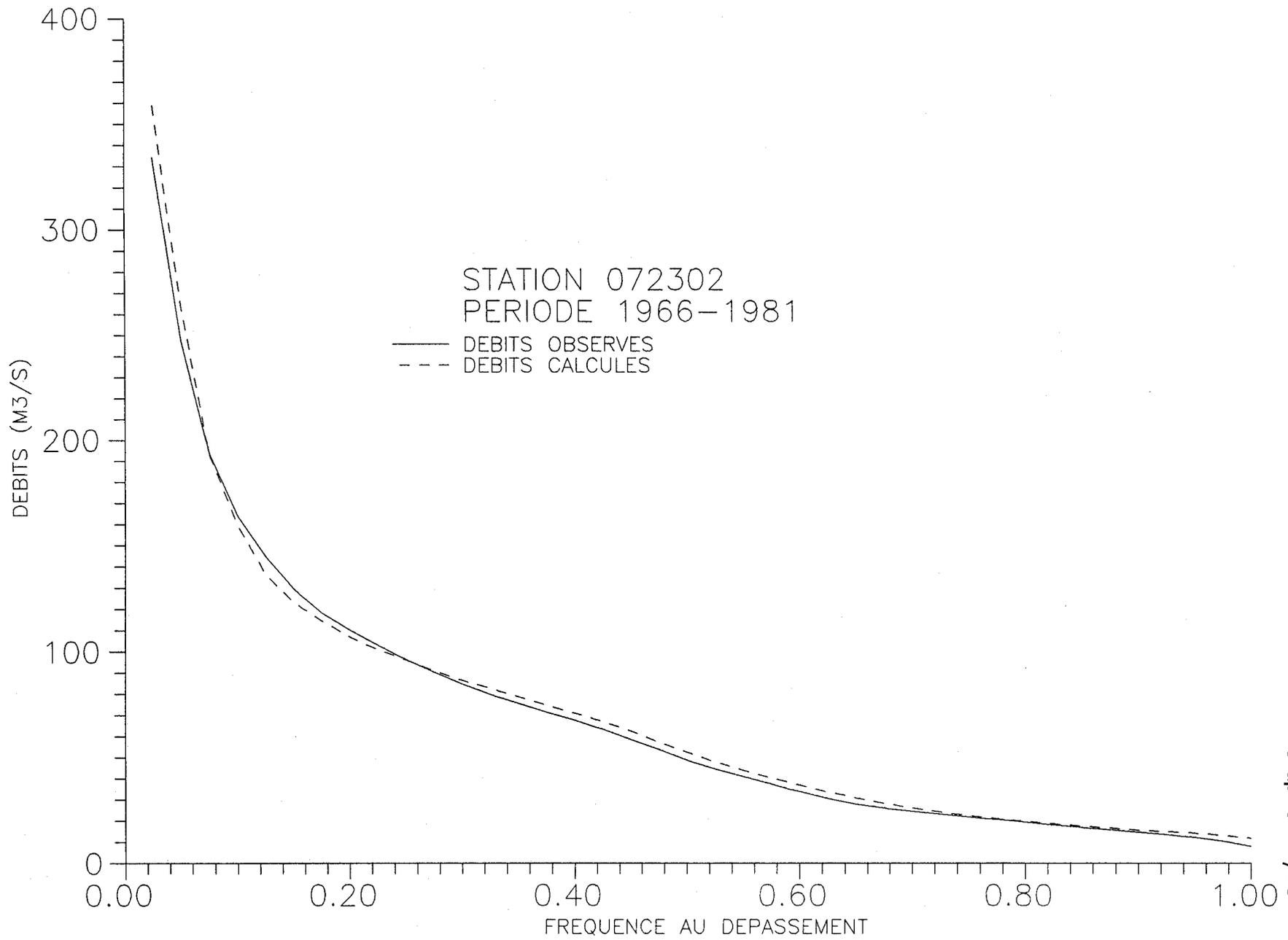


FIGURE 1.6 Débits journaliers, observés et calculés, classés, station 072302.

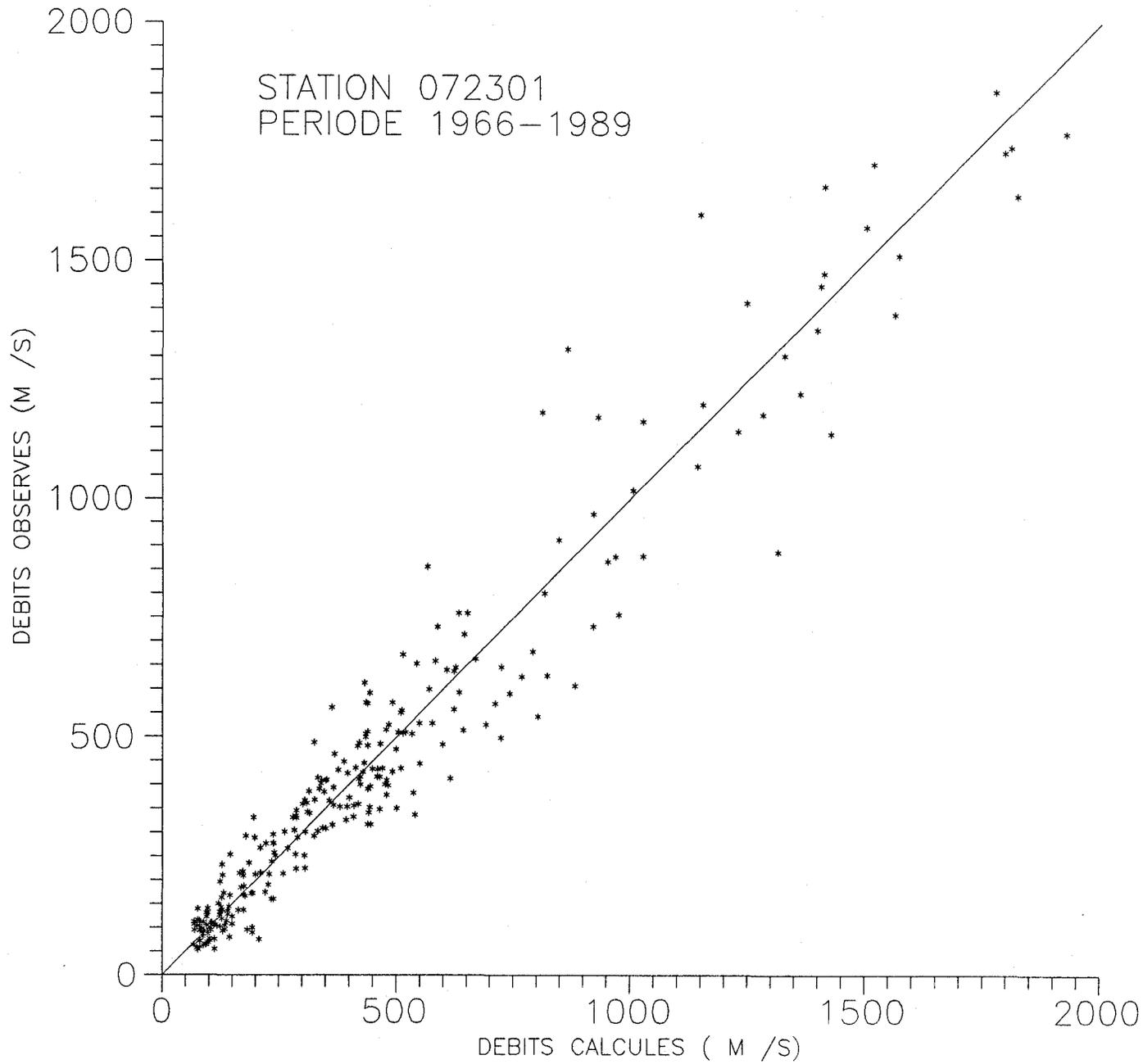


FIGURE 1.7 Débits moyens mensuels observés et calculés, station 072301.

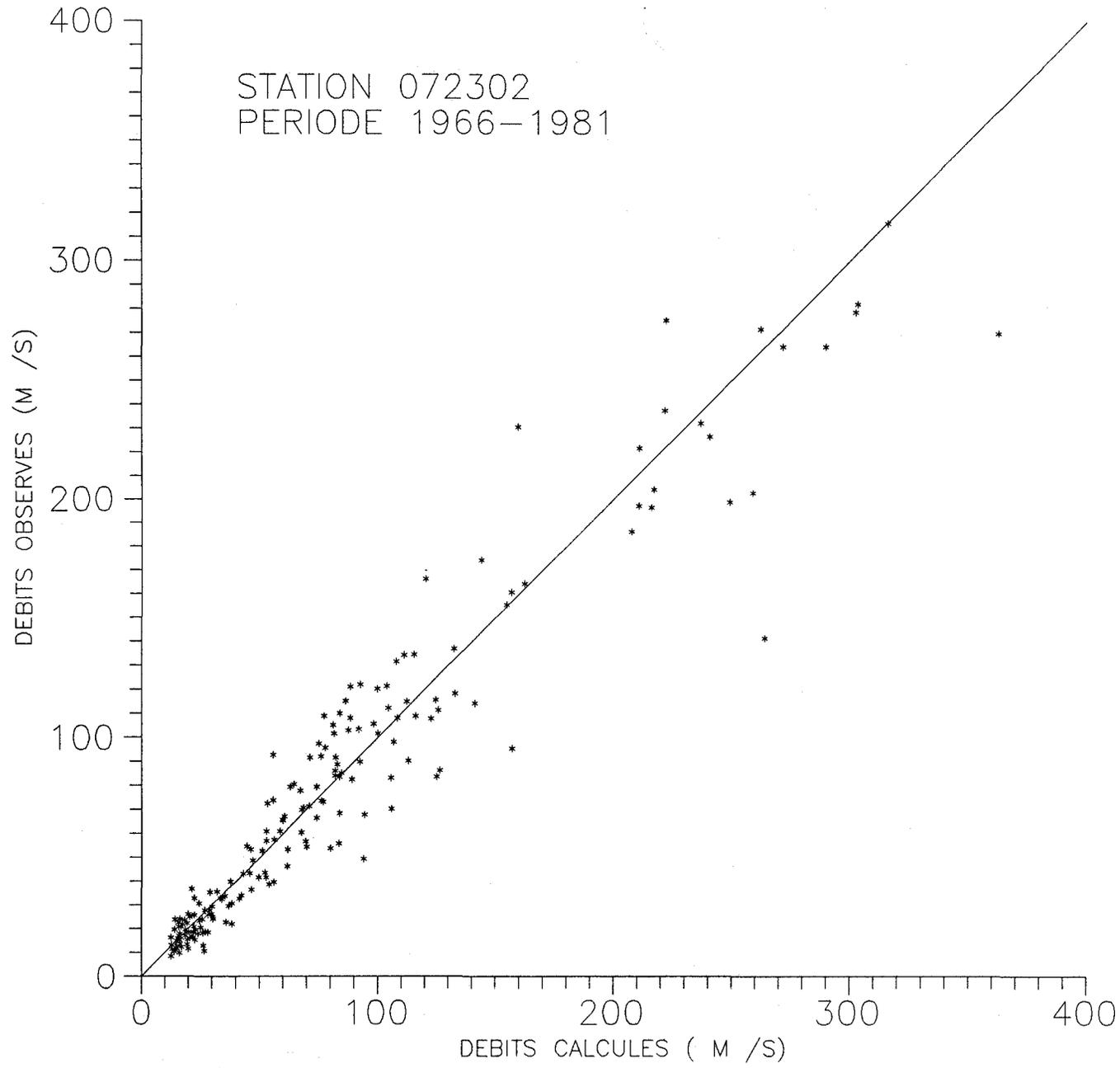


FIGURE 1.8 Débits moyens mensuels observés et calculés, station 072302.

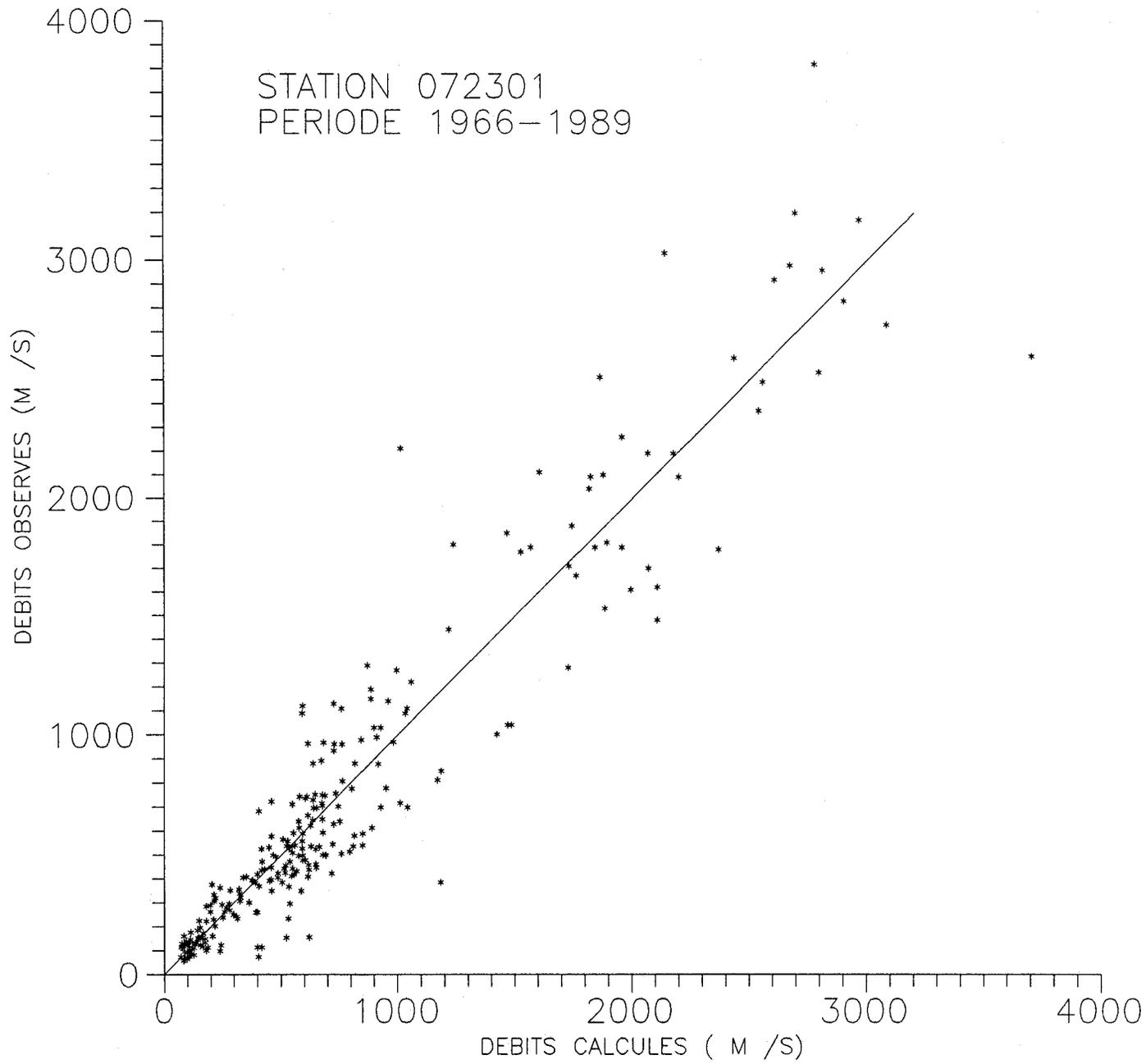


FIGURE 1.9 Débits journaliers maximaux mensuels observés et calculés, station 072301.

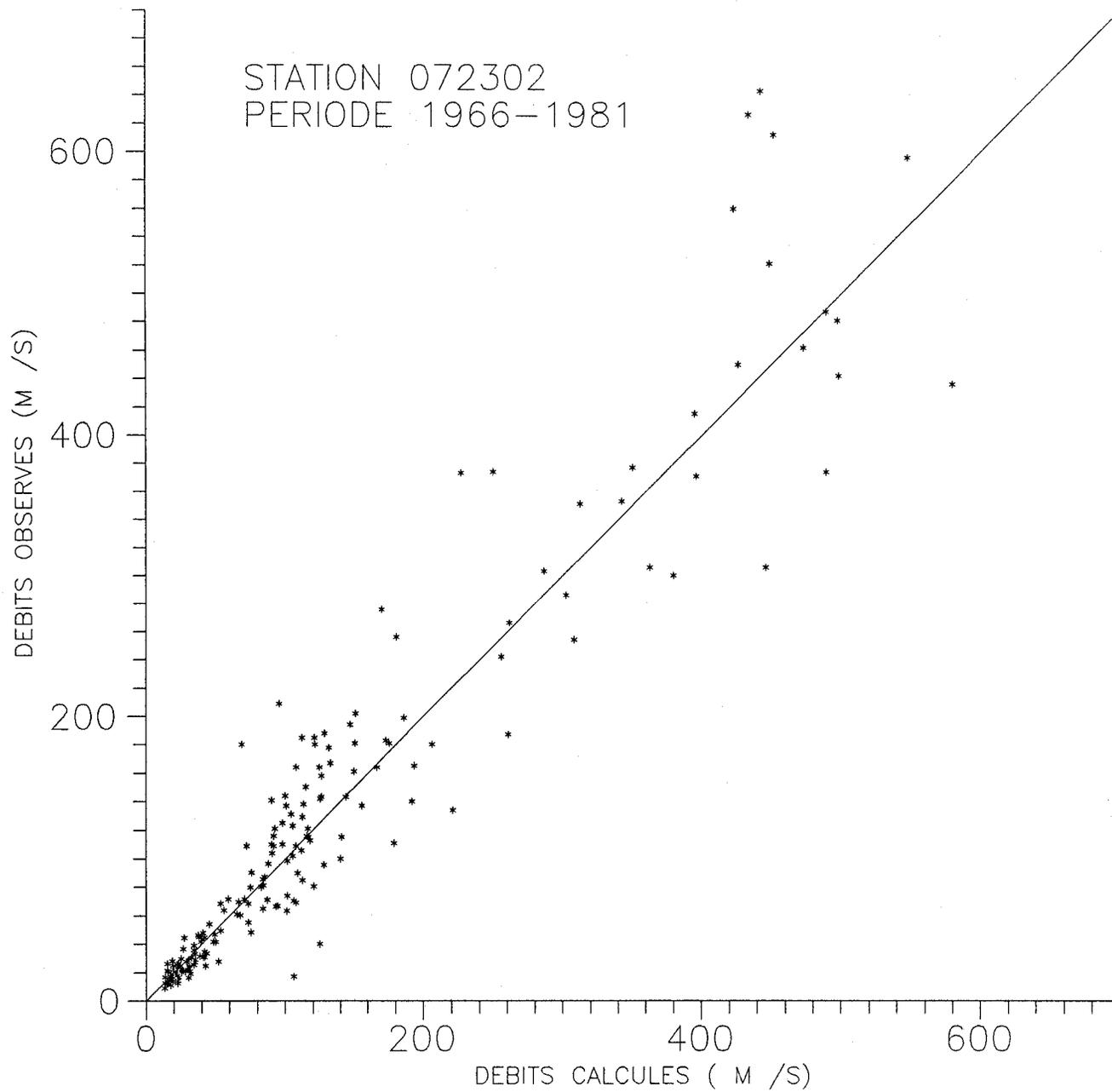
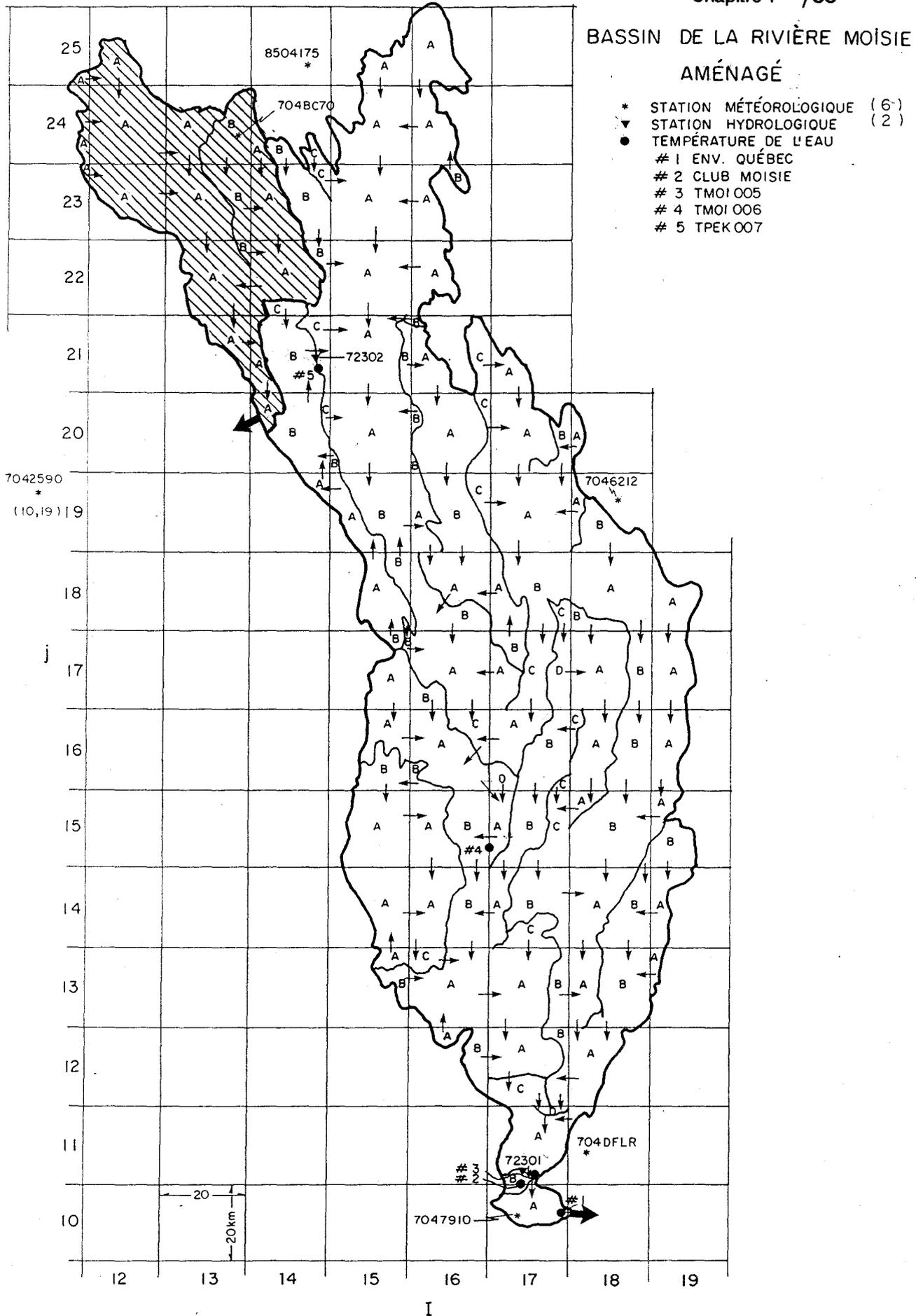


FIGURE 1.10 Débits journaliers maximaux mensuels observés et calculés, station 072302.

BASSIN DE LA RIVIÈRE MOISIE
AMÉNAGÉ



- * STATION MÉTÉOROLOGIQUE (6)
- ▼ STATION HYDROLOGIQUE (2)
- TEMPÉRATURE DE L'EAU
- # 1 ENV. QUÉBEC
- # 2 CLUB MOISIE
- # 3 TMOI 005
- # 4 TMOI 006
- # 5 TPEK 007

FIGURE 1.11 Schématisation du bassin versant de la rivière Moisie après dérivation partielle des rivières aux Pékans et Carheil.

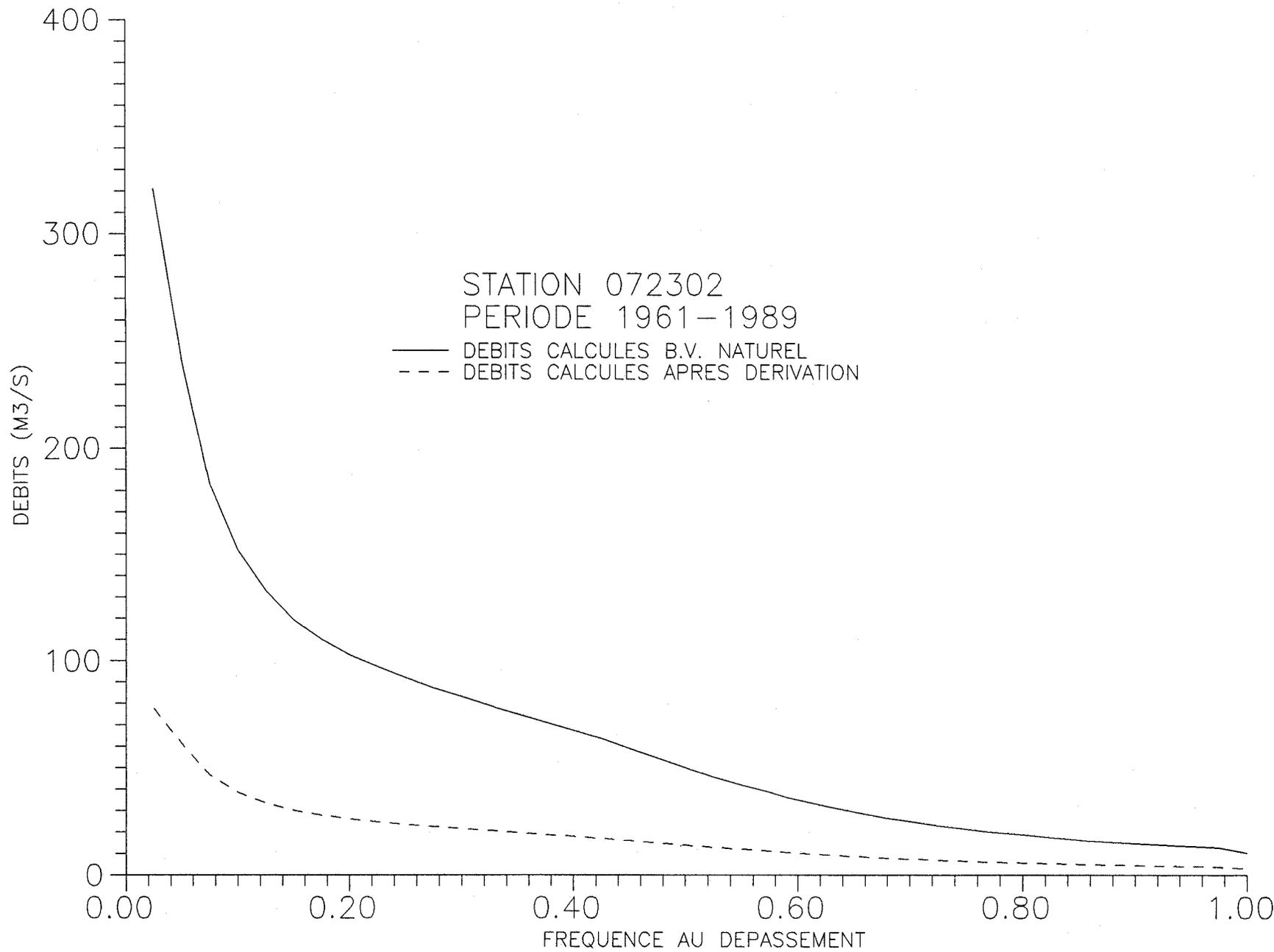


FIGURE 1.12 Débits journaliers classés calculés à la station 072302 de la rivière Aux Pékans, pour le bassin versant naturel et après dérivation.

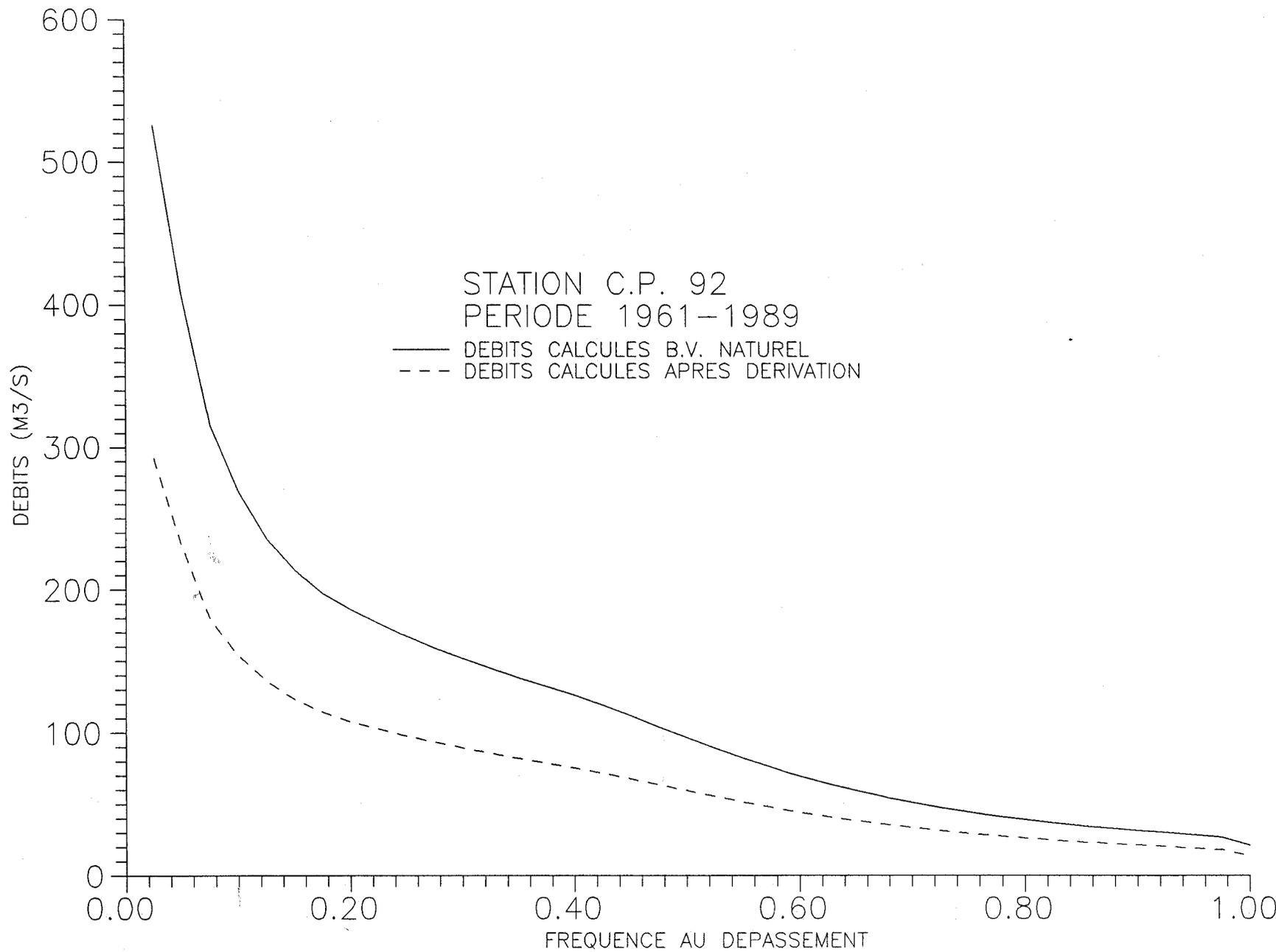


FIGURE 1.13 Débits journaliers classés calculés sur la Moisie en aval de Aux-Pékans pour le bassin versant naturel et après dérivation.

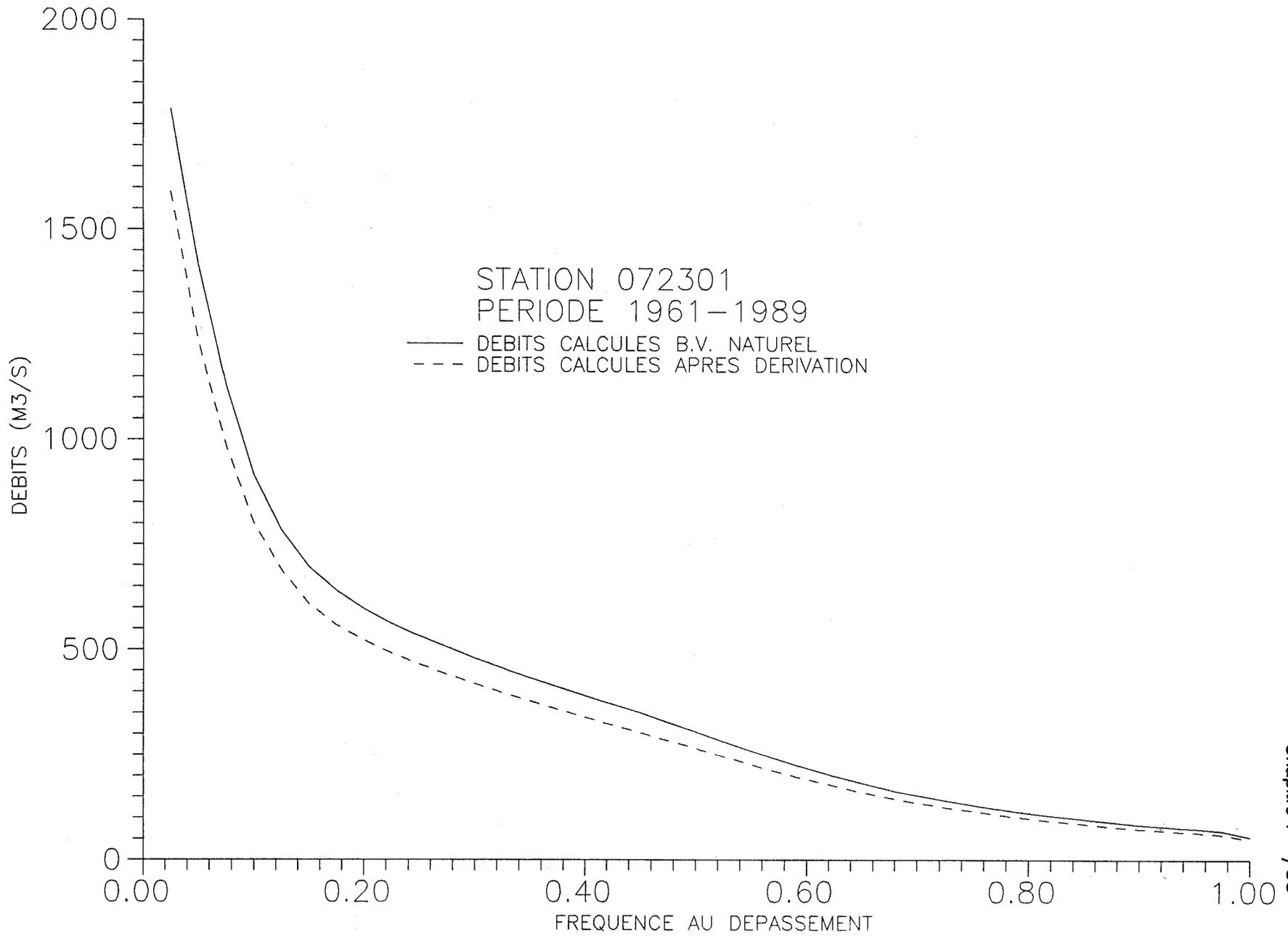


FIGURE 1.14 Débits journaliers classés calculés à la station 072301 de la rivière Moisie pour le bassin versant naturel et après dérivation.

CHAPITRE 2

MODÉLISATION DU RÉGIME THERMIQUE

2.1 INTRODUCTION

Le modèle thermique (Morin et al., 1983; 1987) couplé au modèle hydrologique CEQUEAU permet de calculer les températures de l'eau en rivière à n'importe quel point d'un bassin versant en utilisant la même schématisation du bassin versant que le modèle hydrologique CEQUEAU.

Les paramètres du modèle thermique sont ajustés par essai et erreur en comparant les données mesurées et calculées de température de l'eau en rivières.

Par la suite, l'utilisation du modèle hydrologique et thermique calibré et la disponibilité de longue série météorologique permettent de générer de longue série de températures de l'eau en rivière à n'importe quel point du bassin versant naturel ou aménagé.

2.2 MODELE THERMIQUE

La température de l'eau est calculée en effectuant un bilan d'énergie journalier sur chaque carreau partiel. Ce bilan considère à la fois les échanges d'énergie à la surface de l'eau et les apports thermiques advectifs associés aux différentes formes d'écoulement. Le modèle est unidimensionnel et calcule la température moyenne à l'exutoire des carreaux partiels. Il est implicitement supposé qu'en rivière, les différents volumes écoulés subissent un mélange complet à l'intérieur des limites spatiales d'un carreau partiel pendant un pas de temps journalier. Pendant la période où il peut y avoir un couvert de glace sur la rivière, les échanges d'énergie ne sont pas calculés et la température de l'eau est fixée à 0°C.

Afin d'établir la surface d'échange d'énergie entre l'eau et l'atmosphère sur un carreau partiel donné, la longueur et la largeur moyenne du tronçon de rivière considéré doivent être définies. Ces valeurs peuvent être mesurées sur cartes topographiques ou estimées à l'aide de relations internes au modèle. Dans ce dernier cas, la longueur est fonction de la superficie du carreau partiel et la largeur moyenne est fonction de la

superficie du bassin versant en amont. D'autre part, le modèle permet d'estimer le volume minimal de chaque tronçon de rivière correspondant à un cas d'étiage extrême. Ceci est fait dans le but de mieux représenter l'inertie thermique du tronçon.

Le modèle utilise les données météorologiques suivantes: la température moyenne quotidienne de l'air sur chaque carreau entier, telle qu'estimée par le modèle hydrologique, et les moyennes mensuelles de rayonnement solaire, de nébulosité, de vitesse du vent et de pression de vapeur pour l'ensemble du bassin versant. Le choix de moyennes mensuelles pour ces dernières données est attribuable à la disponibilité limitée de mesures quotidiennes sur le territoire québécois et permet une plus grande applicabilité du modèle. Toutefois, des données à plus haute fréquence peuvent être facilement introduites si elles sont disponibles.

2.2.1 Bilan d'énergie

Le modèle évalue l'enthalpie des volumes d'eau transités sur chaque carreau partiel. L'enthalpie à la fin d'un pas de temps journalier est définie comme étant la somme de l'enthalpie initiale, plus le total des gains et pertes d'énergie subis par le volume d'eau considéré pendant l'intervalle. La température de l'eau (T_e) est établie en effectuant le rapport de l'enthalpie (E) sur le produit du volume considéré (V) par la capacité calorifique de l'eau (C):

$$T_e = E/VC \quad (2.1)$$

Pour les besoins du modèle, l'enthalpie de référence est fixée à 0 mégajoule par mètre cube pour un volume d'eau à 0°C. La capacité calorifique de l'eau (4,187 MJ m⁻³ °C⁻¹) est supposée constante dans la gamme de température qui nous intéresse.

Les quatre principaux termes d'échange d'énergie à la surface de l'eau, à savoir le rayonnement solaire, le rayonnement infrarouge, l'évaporation et la convection sont considérés sur chaque carreau partiel. Chacun de ces termes est représenté par une équation dans laquelle la quantité d'énergie échangée est proportionnelle à la surface

d'eau libre estimée. De plus, un coefficient empirique, déterminé par essais et erreurs, permet d'ajuster l'équation selon les conditions particulières du bassin versant étudié. A priori, la valeur de chaque coefficient d'ajustement devrait être fixée à 1,0. Toutefois, une valeur différente de l'unité peut être utilisée lorsque les données météorologiques ou physiographiques introduites ne sont pas représentatives des conditions qui prévalent sur le bassin. Ça peut être le cas, par exemple, lorsque l'absence de station météorologique sur le bassin versant oblige l'utilisation de données régionales.

Radiation solaire

L'apport d'énergie par rayonnement solaire est estimé à l'aide de l'équation suivante. Dans cette équation, le taux quotidien de rayonnement solaire (R_s) est évalué par interpolation entre les valeurs mensuelles fournies comme données d'entrée. Cette interpolation est nécessaire compte tenu de la non-disponibilité, sur une base journalière, des données du rayonnement solaire. Cependant, si elles sont disponibles, ces données peuvent être facilement utilisées dans le modèle.

$$Q_s = C_s A R_s \quad (2.2)$$

où Q_s = apport quotidien d'énergie par rayonnement solaire (MJ);

C_s = coefficient empirique proche de l'unité;

A = surface d'échange (m^2);

R_s = taux quotidien de rayonnement solaire sur une surface horizontale ($MJ m^{-2}$).

Radiation infrarouge

La quantité nette d'énergie échangée par rayonnement infrarouge est représentée par une équation inspirée de Raphaël (1962) et de Noble et Carroll (1982). La température de l'eau (T_e) est la valeur calculée à la fin du jour précédent. Le coefficient (C_i) inclut la correction reliée à l'émissivité de l'eau qui vaut 0,970. Nous avons:

$$Q_i = C_i A \sigma (\beta T_a^4 - T_e^4) \quad (2.3)$$

- où Q_i = quantité nette d'énergie échangée par rayonnement infrarouge (MJ);
 C_i = coefficient empirique proche de l'unité;
 σ = constante de Stefan-Boltzman pour un pas de temps journalier ($4,9 \times 10^{-9}$ MJ m⁻² K⁻⁴);
 β = émissivité atmosphérique;
 T_a = température moyenne quotidienne de l'air (°K);
 T_e = température de l'eau (°K).

L'émissivité atmosphérique (β) est estimée comme suit (Rinaldi et al., 1979):

$$\beta = (0,74 + 0,0065p) (1 + 0,17n^2) \quad (2.4)$$

- où p = moyenne mensuelle de pression de vapeur (mm Hg);
 n = nébulosité moyenne mensuelle.

Évaporation

La perte d'énergie par évaporation est calculée en reliant le volume d'eau évaporée à l'énergie latente perdue. La lame d'eau évaporée journalièrement (l_e) est estimée par le modèle hydrologique à l'aide de l'équation de Thornthwaite modifié (Gray et al., 1972) dans laquelle la température de l'air est le paramètre principal. Ainsi:

$$Q_e = -C_e l_e A H \quad (2.5)$$

- où Q_e = quantité d'énergie perdue par évaporation (MJ);
 C_e = coefficient empirique proche de l'unité;
 l_e = lame quotidienne d'eau évaporée (m);
 H = chaleur latente d'évaporation (2 480 MJ m⁻³).

Convection

La quantité d'énergie échangée par convection est fonction de la différence de température entre l'air (T_a) et l'eau (T_e) et de la vitesse du vent (Raphaël, 1962; Marcotte et Duong, 1973):

$$Q_c = C_c A 0,2 W (T_a - T_e) \quad (2.6)$$

où Q_c = quantité d'énergie échangée par convection (MJ);
 C_c = coefficient empirique proche de l'unité;
 W = moyenne mensuelle de vitesse du vent à environ 10 m du sol (km h⁻¹).

En plus des échanges à la surface de l'eau, le modèle de température calcule les apports d'énergie associés au ruissellement, à l'écoulement hypodermique et à l'écoulement de base. Les apports d'énergie liés à ces trois formes d'écoulement permettent de tenir compte, d'une façon indirecte, des apports thermiques dus aux précipitations. La température des eaux de ruissellement est, empiriquement, supposée égale à celle de l'air avec une limite inférieure fixée à 0°C. La température de l'écoulement hypodermique est estimée en faisant la moyenne entre la température du ruissellement superficiel et la température de l'écoulement de base. La température de l'écoulement de base est évaluée à partir des données régionales disponibles. Elle peut être prise comme une constante ou être variable selon une sinusoïde annuelle.

Une fois complété sur chaque carreau partiel le bilan local des échanges d'énergie à la surface de l'eau et des apports advectifs, les transferts d'énergie entre les carreaux partiels sont calculés. La quantité d'énergie transférée est fonction du volume d'eau écoulé et de la température de l'eau sur le carreau partiel d'origine.

Le bilan global d'énergie n'est pas effectué pendant la période où la rivière peut être couverte de glace. Cette période est définie empiriquement à l'aide d'un paramètre du modèle qui est fonction du stock de neige au sol.

2.2.2 Calage du modèle thermique

Le modèle comporte douze paramètres ou constantes à ajuster pour simuler correctement les températures de l'eau en rivière. Deux paramètres sont utilisés pour modifier si nécessaire les données physiographiques. Quatre autres, dont la valeur devrait varier autour de l'unité, permettent d'ajuster l'influence relative de la radiation solaire, du rayonnement infrarouge, de l'évaporation et de la convection. Les autres paramètres ou constantes sont utilisés pour fixer les conditions initiales et pour déterminer la fin de la période hivernale. La liste des paramètres ou constantes utilisés par le modèle thermique sont décrits au tableau 2.1.

L'ajustement des paramètres se fait par essais et erreurs en utilisant principalement l'étude graphique des températures de l'eau, observées et calculées. La calibration a pour but de trouver la valeur des paramètres pour que les températures de l'eau calculées par le modèle soit représentative des températures observées et qu'il n'y ait pas d'erreur systématique dans les simulations.

2.3 APPLICATION DU MODELE THERMIQUE AU BASSIN VERSANT NATUREL DE LA RIVIERE MOISIE

Le modèle thermique a été ajusté sur le bassin versant naturel de la rivière Moisie en utilisant les paramètres ajustés du modèle hydrologique et la banque de données physiographiques préparée précédemment, figure 1.3.

La calibration terminée, le modèle thermique peut être utilisé pour estimer les températures de l'eau à la sortie de chaque carreau partiel pour le bassin versant naturel ou aménagé, en utilisant la banque de données physiographiques du bassin versant naturel (figure 1.3) ou du bassin versant aménagé (figure 1.11).

2.3.1 Données météorologiques

En plus des données journalières de température moyenne de l'air sur chaque carreau partiel, fournit par le modèle hydrologique CEQUEAU, la mise en opération de la sous-routine de calcul de la température de l'eau nécessite les données supplémentaires suivantes: radiation solaire, pression de vapeur, ennuagement et vitesse du vent. Ces données n'étant pas disponibles à l'échelle journalière pour plusieurs régions du Québec, la sous-routine de calcul de la température de l'eau en rivière a été développée pour utiliser les valeurs moyennes mensuelles. Le tableau 2.2 présente les données mensuelles utilisées pour les simulations du régime thermique de la rivière Moisie.

2.3.2 Données de température de l'eau

Les données de température de l'eau utilisées, pour la calibration et la vérification du modèle thermique, proviennent de trois sources, le Club Saumon Moisie Inc., le Ministère de l'Environnement du Québec et du service hydraulique d'Hydro-Québec. L'emplacement des stations de mesures sur le bassin versant de la rivière Moisie est montré sur la figure 1.3. Les données disponibles de chaque source sont:

Club Saumon Moisie Inc.

- Dix-huit années (1973 à 1990) de données journalières sur une période d'environ deux mois, 1^{er} juin au 31 juillet, mesurées sur la rivière Moisie près du chalet principal du Club Saumon Moisie Inc., situé près de l'estuaire.

Ministère de l'Environnement du Québec

- 395 mesures sur la rivière Moisie, au pont de la Route 138, prises à intervalles irréguliers entre 1974 et 1989.

Vice-présidence Environnement d'Hydro-Québec

- Les mesures à trois thermographes installés par Hydro-Québec sur la rivière Moisie et aux Pékans. Les températures de l'eau ont été enregistrées de juillet 1989 à la prise du couvert de glace à l'automne 1989.

2.3.3 Ajustement des paramètres du modèle thermique

Les premiers ajustements des paramètres ont été faits par essais et erreurs en utilisant les températures de l'eau mesurées au Club Saumon Moisie Inc. et au pont Route 138 pour la période 1973 à 1980. Les mesures à ces deux stations, bien que très près l'une de l'autre, présentent des différences appréciables même pour les jours où les mesures sont concomitantes. L'analyse sommaire des données montre que les températures mesurées au pont Route 138 sont très variables et présentent quelques fois des valeurs non réalistes. Par exemple, des valeurs élevées pour les mois du printemps ou de l'automne en 1987, les valeurs mesurées au mois d'août et de septembre sont beaucoup trop faibles. D'une façon générale les températures de l'eau mesurées au pont Route 138 semblent trop élevées par rapport à celles mesurées au Club Moisie Inc.. Les températures de l'eau mesurées à ces deux stations pour les années 1973 à 1989 sont montrées aux figures 2.1 à 2.3 avec les températures calculées par le modèle. Compte tenu des doutes sur la représentativité des températures de l'eau mesurées au pont Route 138, l'ajustement des paramètres a été fait en donnant priorité aux mesures du Club Moisie Inc.. L'ajustement final des paramètres a été fait en utilisant les mesures des trois thermographes, installés par le service hydraulique d'Hydro-Québec, pour l'année 1989.

Le tableau 2.3 montre les valeurs finales des paramètres du modèle thermique ajusté au bassin versant de la rivière Moisie.

La précision du modèle peut se mesurer par l'erreur quadratique moyenne (EQM) entre les températures de l'eau calculées et mesurées. Par rapport aux 240 mesures thermographiques faites par Hydro-Québec en 1989, l'EQM est de 1,02°C. Par rapport

aux 660 mesures du Club de pêche Saumon Moisie Inc., cette erreur est de 1,32°C. L'erreur quadratique moyenne provient en grande partie du fait que les mesures sont ponctuelles et instantanées (8 heures du matin pour le Club de pêche Moisie Inc.), alors que les températures calculées par le modèle sont des moyennes journalières sur toute la section d'écoulement.

Nous estimons par ailleurs que l'erreur quadratique moyenne des températures calculées est du même ordre de grandeur, c'est-à-dire environ 1°C, après détournement avec ou sans débit réservé que pour le bassin versant naturel.

2.3.4 Résultats des simulations du régime thermique

Compte tenu du peu d'observations disponibles à chaque année aucun critère numérique autre que l'erreur quadratique moyenne n'a été calculé parce que l'erreur sur l'estimation des critères serait beaucoup trop importante. Les résultats de l'ajustement du modèle thermique sont présentés graphiquement. Les figures 2.1 à 2.3 montrent les températures de l'eau journalières calculées et observées près du chalet principal du Club Moisie Inc. et au pont Route 138, pour les années 1973 à 1989. Ces graphiques montrent qu'en général les températures calculées de l'eau sont comparables aux températures observées par le Club Moisie Inc. et on ne décèle pas d'erreur systématique entre les températures de l'eau calculées par le modèle et celles mesurées par le Club Moisie Inc.. Par contre les températures observées au pont Route 138 par le ministère de l'Environnement du Québec sont en général plus élevées que celles calculées par le modèle. Comme nous l'avons vu précédemment ces données mesurées au pont Route 138 ne nous semblent pas représentatives et l'ajustement des paramètres a été fait en donnant priorité aux données du Club Moisie Inc.. Les mesures au pont Route 138 sont montrées sur les figures 2.1 à 2.3 à titre indicatif seulement.

La figure 2.4 montre pour l'année 1989, les températures journalières de l'eau mesurées à l'aide d'un thermographe d'Hydro-Québec et calculées à la station TMOI005 sur la rivière Moisie. Les mesures effectuées au pont Route 138 par le ministère de l'Environnement du Québec sont également montrées. Les températures calculées reproduisent bien les valeurs mesurées au thermographe. De plus sur cette figure on

observe que les valeurs mesurées au pont Route 138 sont systématiquement plus élevées que les valeurs mesurées au thermographe. La surévaluation est semblable à celle observée entre les mesures du Club Moisie Inc. et les mesures au pont de la Route 138 et confirme la non-représentativité des mesures au pont de la Route 138.

La figure 2.5 montre les températures journalières de l'eau mesurées à l'aide d'un thermographe et calculées à la station TMOI006 sur la rivière Moisie. Les valeurs mesurées sont bien reproduites par le modèle sauf pour la période du milieu d'août à la fin de septembre. Compte tenu des résultats aux stations, TMOI005 et TPEK007, pour la même période et l'observation d'un décalage à peu près constant entre les températures calculées et celles mesurées pour cette période nous croyons qu'il y a une erreur "d'échelle" et qu'il est nécessaire de revoir les enregistrements pour cette période.

La figure 2.6 montre les températures journalières de l'eau mesurées à l'aide d'un thermographe et calculées à la station TPEK007 sur la rivière aux Pékans. Les valeurs calculées montrent une plus grande variation que les valeurs mesurées mais reproduisent quand même l'allure générale des températures observées. La plus grande variation des températures calculées s'explique par le fait que le bassin versant est petit ce qui implique que la quantité d'eau dans la rivière est faible et qu'une légère erreur sur les données météorologiques telle que la radiation solaire entraîne une plus grande variation des températures calculées que celles sur les températures observées.

L'analyse des températures de l'eau mesurées aux trois thermographes a fait ressortir une variation spatiale des températures de l'eau sur le bassin versant. Les températures de l'eau sont plus froides en amont du bassin versant. Cette caractéristique est bien reproduite par le modèle thermique comme on le voit à la figure 2.7. Cette figure montre les températures de l'eau moyenne calculées pour la période 1961 à 1989 à trois sites sur le bassin versant. Les sites utilisés sont: Moisie à la station 072301 (c.p. #3), Moisie à la station TMOI006 (c.p. #46) et aux Pékans à la station 072302 (c.p. #96). La figure 2.8 montre les températures médianes calculées pour le bassin versant naturel aux stations: Moisie à la station 072301 (c.p. #3), Moisie en aval de la rivière aux Pékans (c.p. #92) et aux Pékans à la station 072302 (c.p. #96)

L'ensemble des résultats montre que les valeurs des paramètres retenues pour le modèle thermique permettent de reproduire les températures à n'importe quel point sur le bassin versant et que le modèle peut être utilisé pour générer de longue série pour le bassin versant naturel ou après dérivation.

TABLEAU 2.1 Paramètres intervenant dans le modèle thermique.

Paramètres	Description
COPROM	Coefficient permettant de modifier la profondeur minimale du tronçon de rivière pour tous les carreaux partiels COPROM devrait être fixé à 1,0 pour la première simulation.
COLARG	Coefficient permettant de modifier la largeur du tronçon de rivière pour tous les carreaux partiels. COLARG devrait être fixé à 1,0 pour la première simulation.
CRAYSO	Coefficient permettant d'augmenter ou de diminuer l'importance du rayonnement solaire dans le bilan d'énergie; devrait être fixé à 1,0 pour la première simulation.
CRAYN	Coefficient permettant d'augmenter ou de diminuer l'importance du rayonnement infrarouge dans le bilan d'énergie; devrait être fixé à 1,0 pour la première simulation.
CEVAPO	Coefficient permettant d'augmenter ou de diminuer l'importance de l'évaporation dans le bilan d'énergie; devrait être fixé à 1,0 pour la première simulation.
CCONVE	Coefficient permettant d'augmenter ou de diminuer l'importance de la convection dans le bilan d'énergie; devrait être fixé à 1,0 pour la première simulation.
CRIGEL	Critère de gel vérifié à chaque carreau partiel: si le stock de neige au sol est supérieur à CRIGEL, la température des eaux de ruissellement est fixée à 0°C; si le stock de neige est inférieur à CRIGEL, la température des eaux de ruissellement est linéairement fixée entre 0°C et la température de l'air en fonction du stock; si le stock de neige est nul, les eaux de ruissellement sont supposées être à la température de l'air (CRIGEL est exprimé en mm d'eau).
TNAP	Température moyenne annuelle des eaux souterraines sur le bassin versant (0°C).

TABLEAU 2.1 (suite)

Paramètres	Description
PANAP	Paramètre permettant d'ajuster la température de l'écoulement souterrain arrivant en rivière. Lorsque PANAP = 0,0, cette température vaut TNAP; lorsque PANAP = 1,0, cette température vaut la température de l'air si positive. PANAP peut être fixé entre 0,0 et 1,0 et son influence est linéaire entre ces deux limites.
TINIT	Température moyenne de l'eau sur l'ensemble du bassin versant estimée au premier jour des simulations (0°C).
BASSOL	Lame de précipitation totale permettant de détecter les jours de faible rayonnement solaire (mm d'eau).
CORSOL	Correction du rayonnement solaire moyen (RSM) pour les jours sans pluie ($RSM \cdot (1 + CORSOL)$) et les jours de fortes pluies ($RSM \cdot (1 - CORSOL)$) (varie entre 0,0 et 1,0).

TABLEAU 2.2 Données météorologiques moyennes mensuelles utilisées pour les simulations de la température de l'eau de la rivière Moisie.

Paramètre	Station	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Radiation solaire ⁽¹⁾ (MJ m ⁻²)	Sept-Iles	4,32	8,04	11,78	14,86	18,36	20,60	18,47	17,05	11,69	7,14	4,13	3,16
Ennuagement ⁽²⁾	Estimé sur carte	0,67	0,57	0,62	0,62	0,57	0,56	0,56	0,53	0,62	0,65	0,72	0,68
Vent (km/h) ⁽³⁾	Moyenne Sept-Iles - lac Eon	16,7	16,3	17,3	16,3	15,6	14,3	13,3	13,3	14,8	15,4	15,8	16,1
Pression vapeur ⁽⁴⁾	Moyenne Sept-Iles - lac Eon	1,5	1,5	2,2	3,2	4,6	7,0	9,3	8,9	6,7	4,6	3,2	1,7

(1) Radiation solaire, normales climatiques du Canada 1951-1980, Environnement Canada (1982).

(2) L'ensoleillement au Québec, Gariépy *et al.* (1981).

(3) Vent, normales climatiques du Canada 1951-1980, Environnement Canada (1982).

(4) Station, sea level and vapour pressure normals 1953-1972, Environnement Canada (1976).

TABLEAU 2.3 Valeurs finales des paramètres du modèle thermique.

Paramètres	Valeurs
COPRO	1,00
COLARG	1,30
CRAYSO	1,50
CRAYN	1,00
CEVAPO	0,70
CCONVE	1,50
CRIGEL	0,00 mm
TNAP	5,50 °C
PANAP	0,50
TINIT	0,10 °C
BASSOL	15,00 mm
CORSOL	0,25

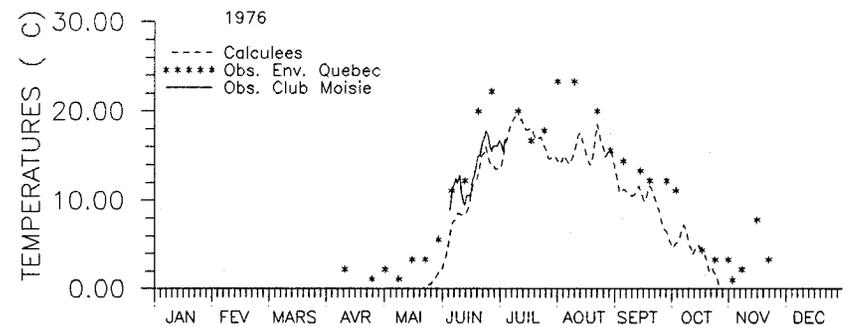
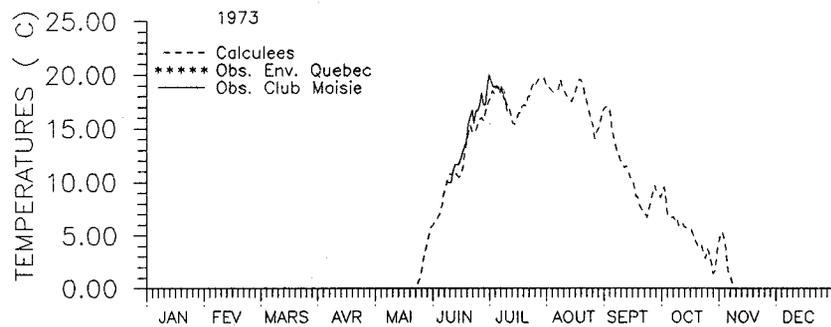
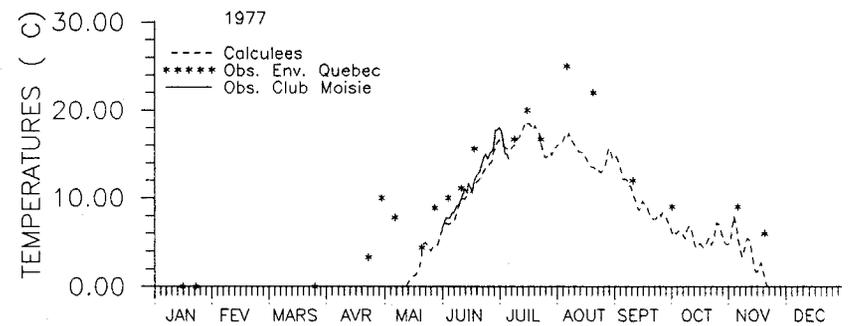
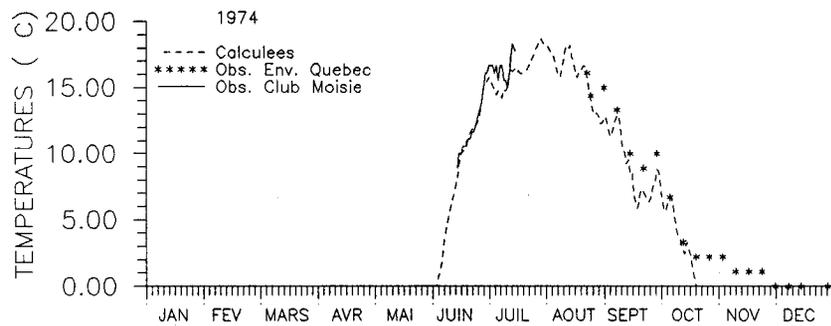
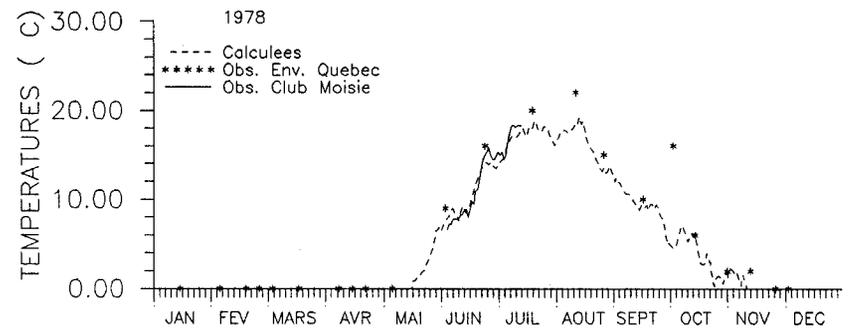
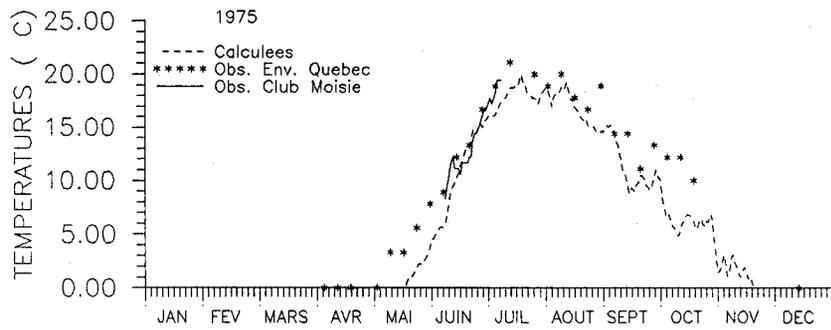


FIGURE 2.1 Températures journalières de l'eau calculées et mesurées sur la rivière Moisie pour les années 1973 à 1978.

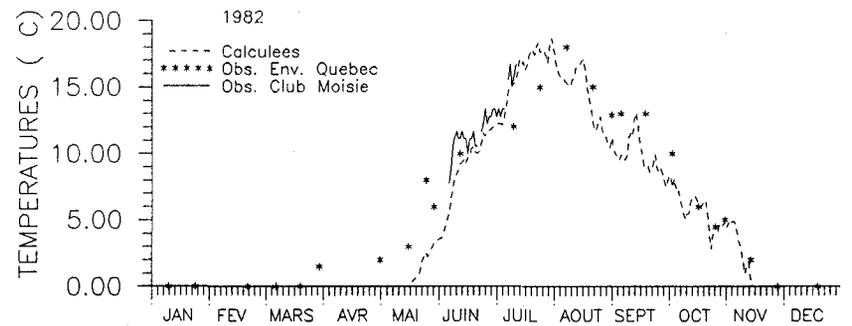
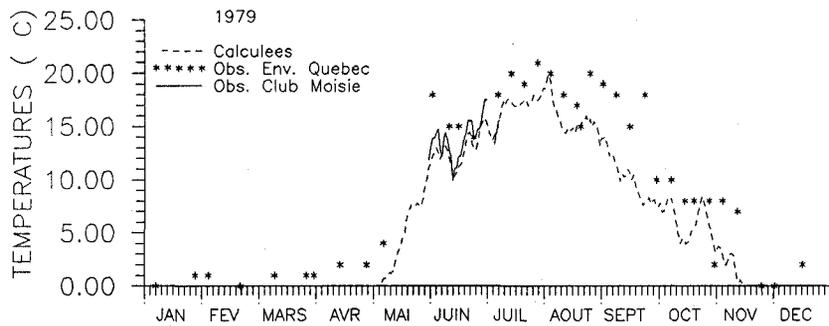
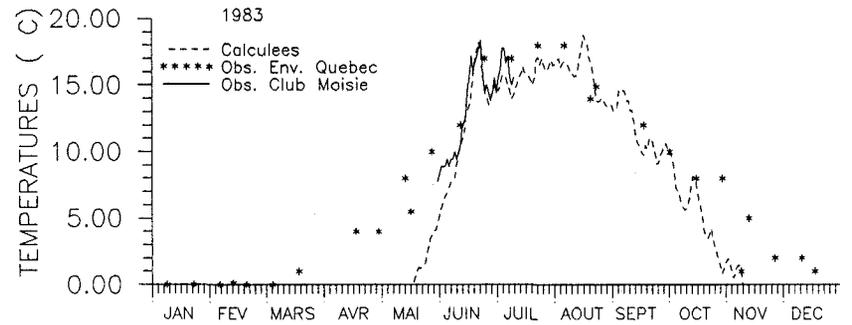
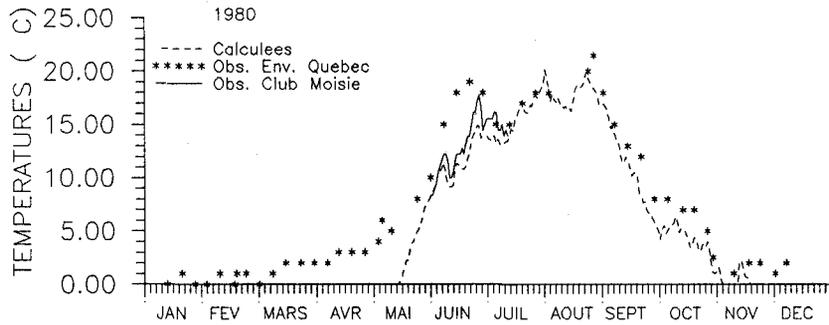
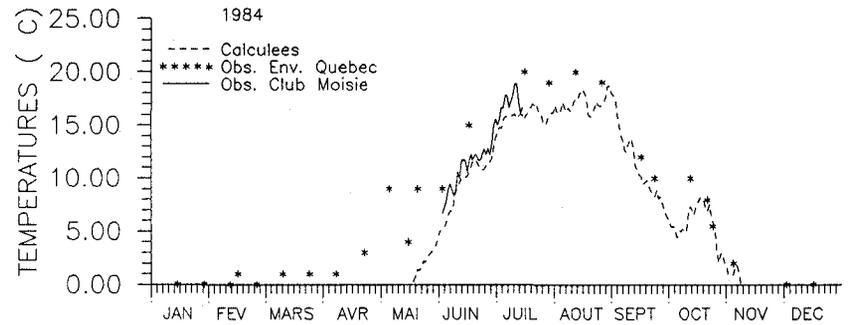
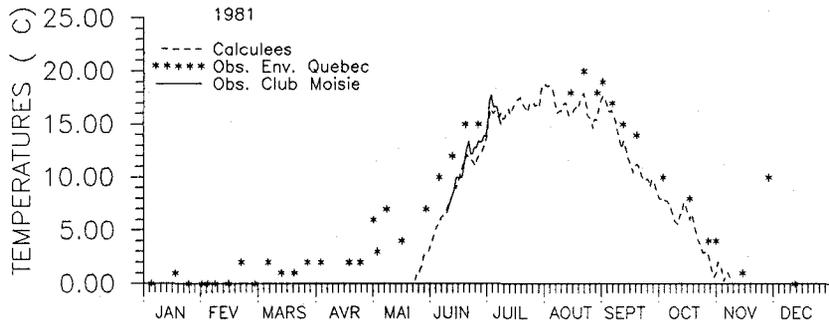


FIGURE 2.2 Températures journalières de l'eau calculées et mesurées sur la rivière Moisie pour les années 1979 à 1984.

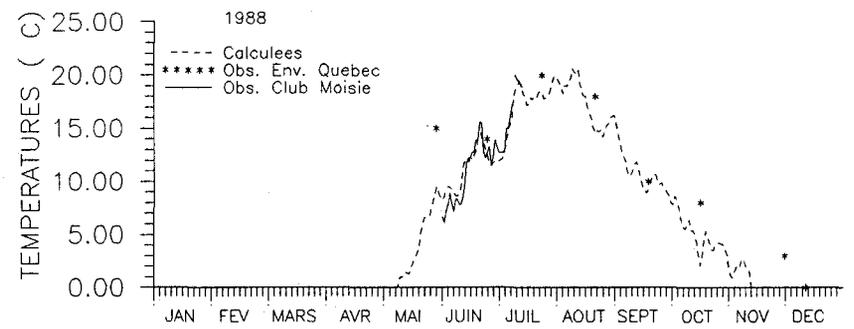
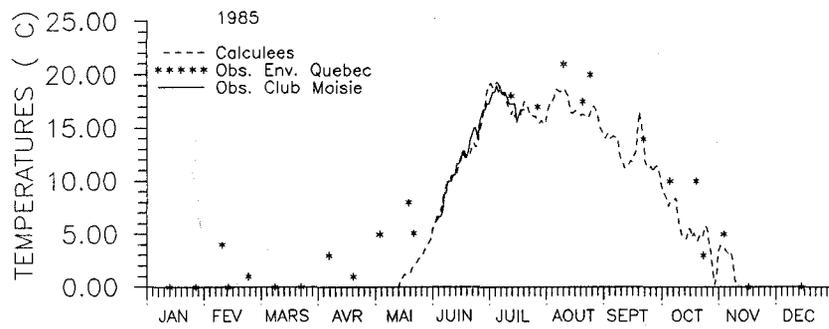
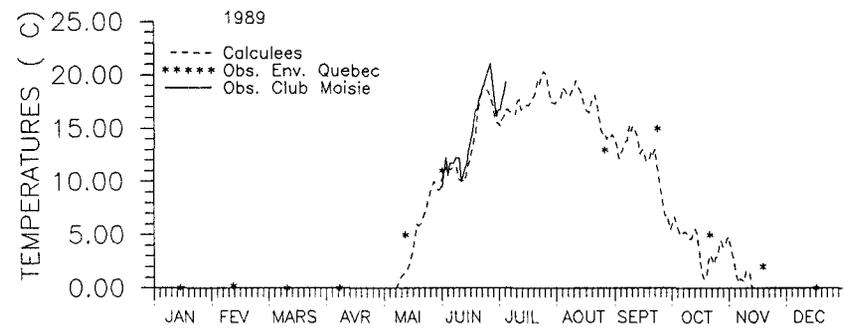
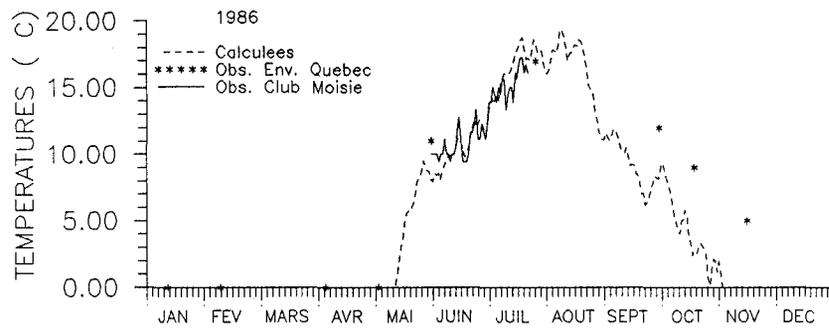
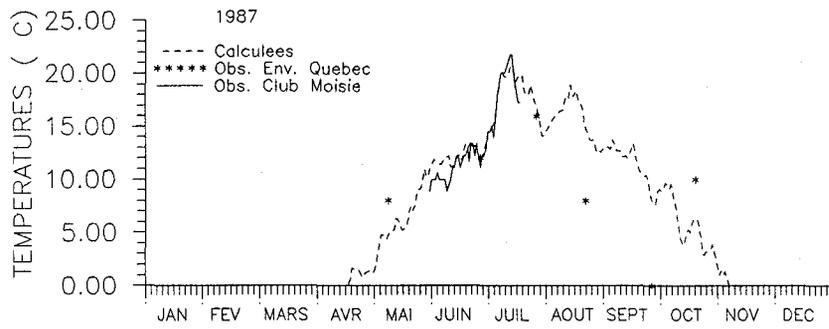


FIGURE 2.3 Températures journalières de l'eau calculées et mesurées sur la rivière Moisie pour les années 1985 à 1989.

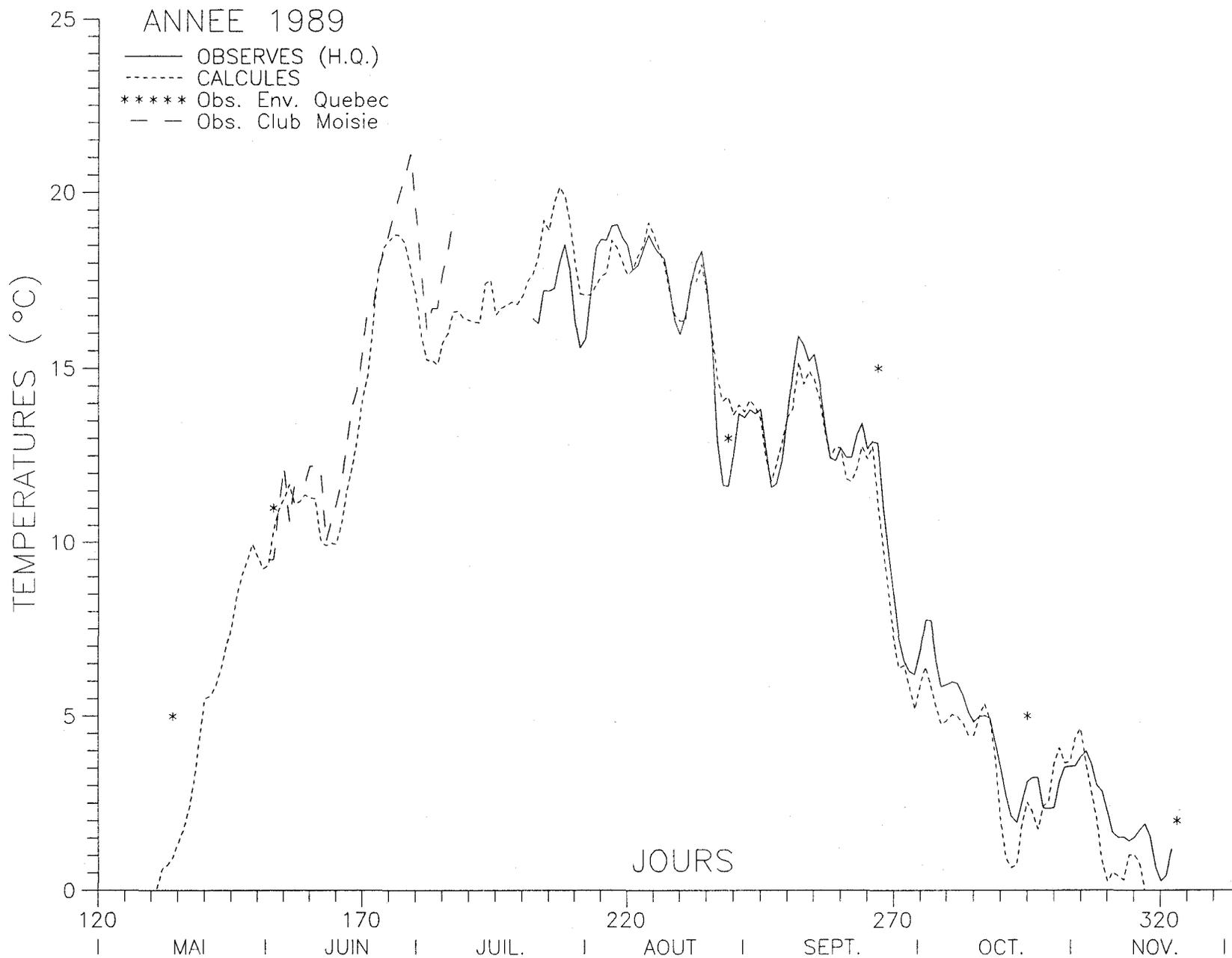


FIGURE 2.4 Températures de l'eau calculées et mesurées par thermographe à la station TMOI005 sur la rivière Moisie pour l'année 1989.

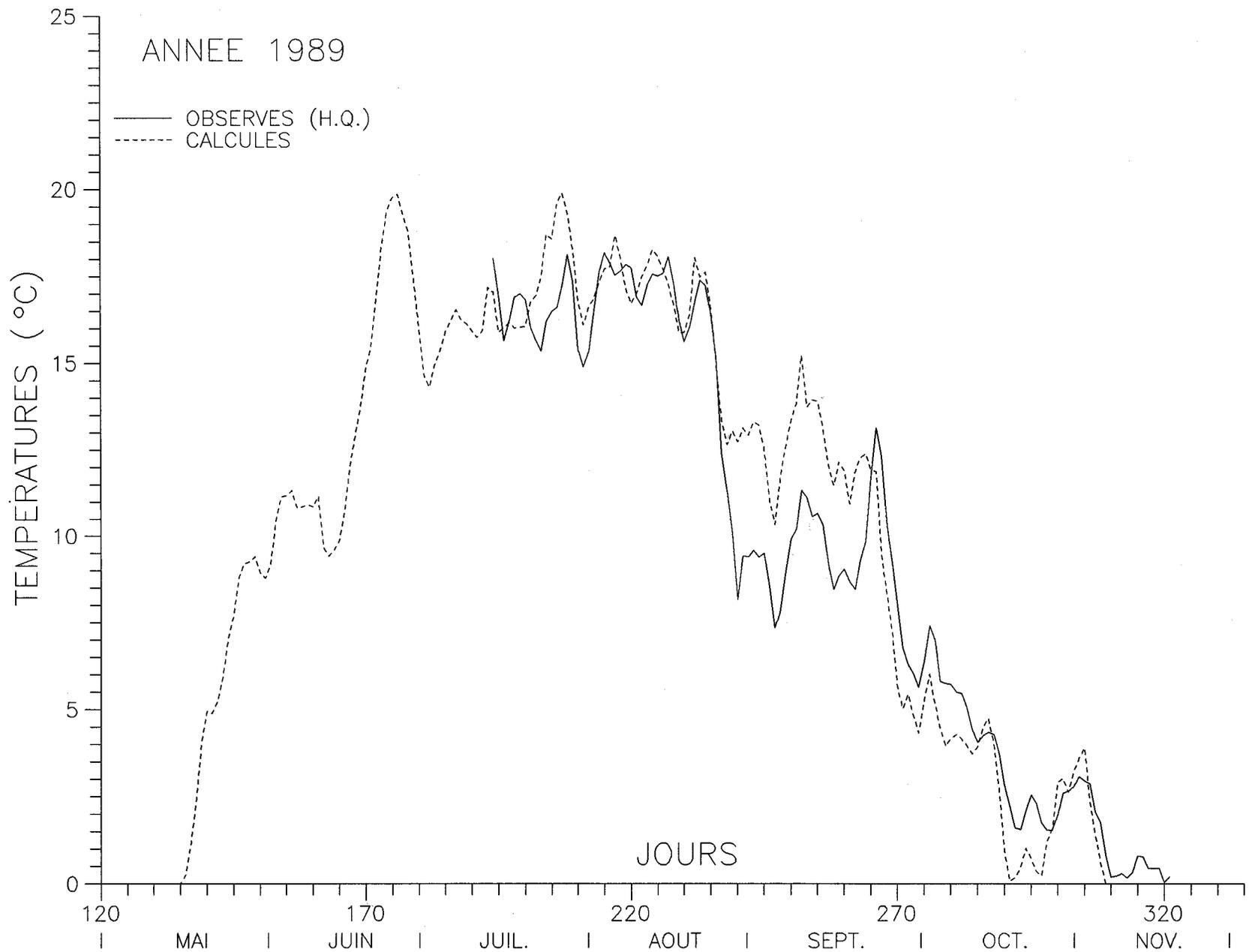


FIGURE 2.5 Températures de l'eau calculées et mesurées par thermographe à la station TMOI006 sur la rivière Moisie pour l'année 1989.

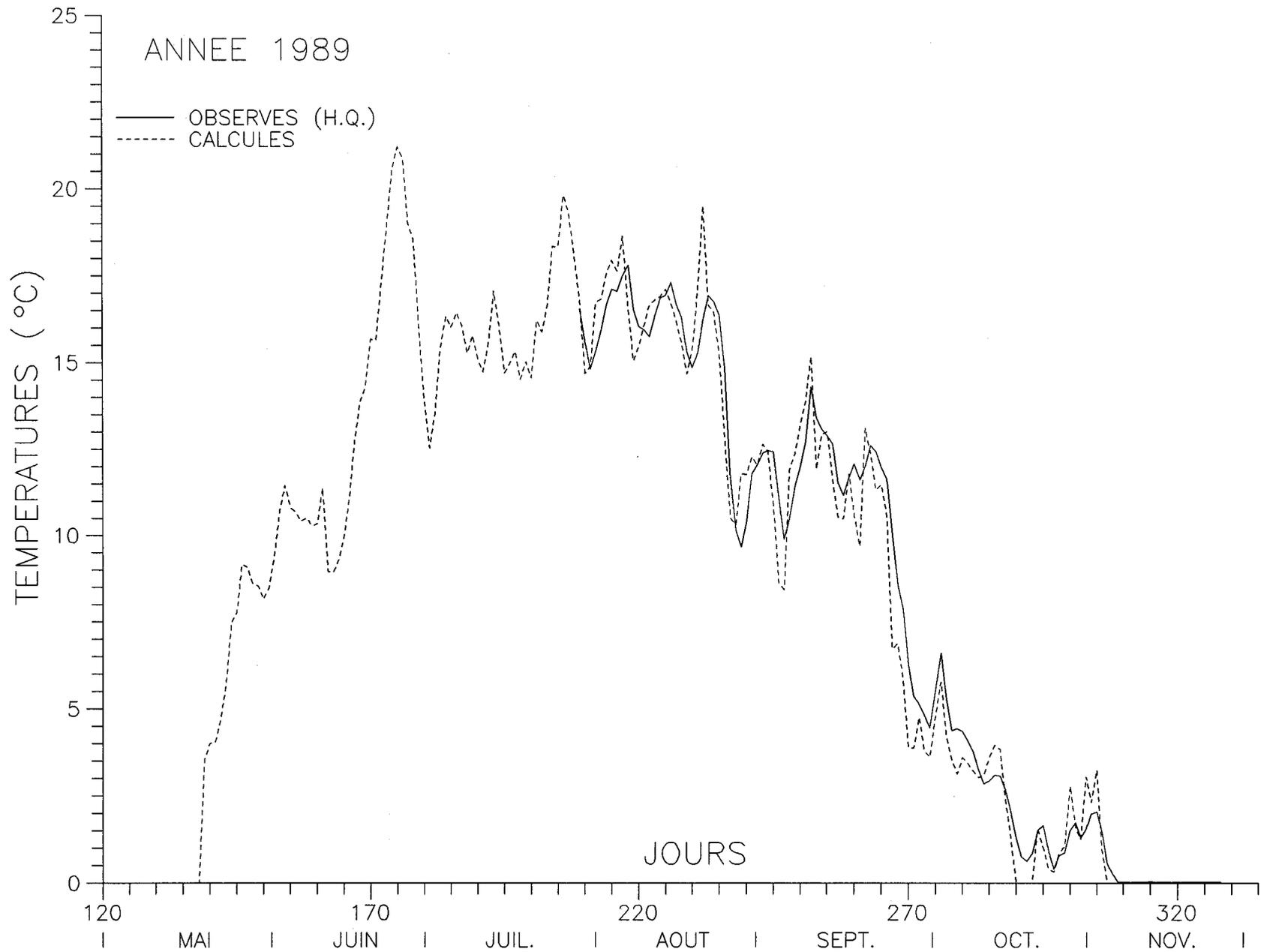


FIGURE 2.6 Températures de l'eau calculées et mesurées par thermographe à la station TPEK007 sur la rivière Aux Pékans pour l'année 1989.

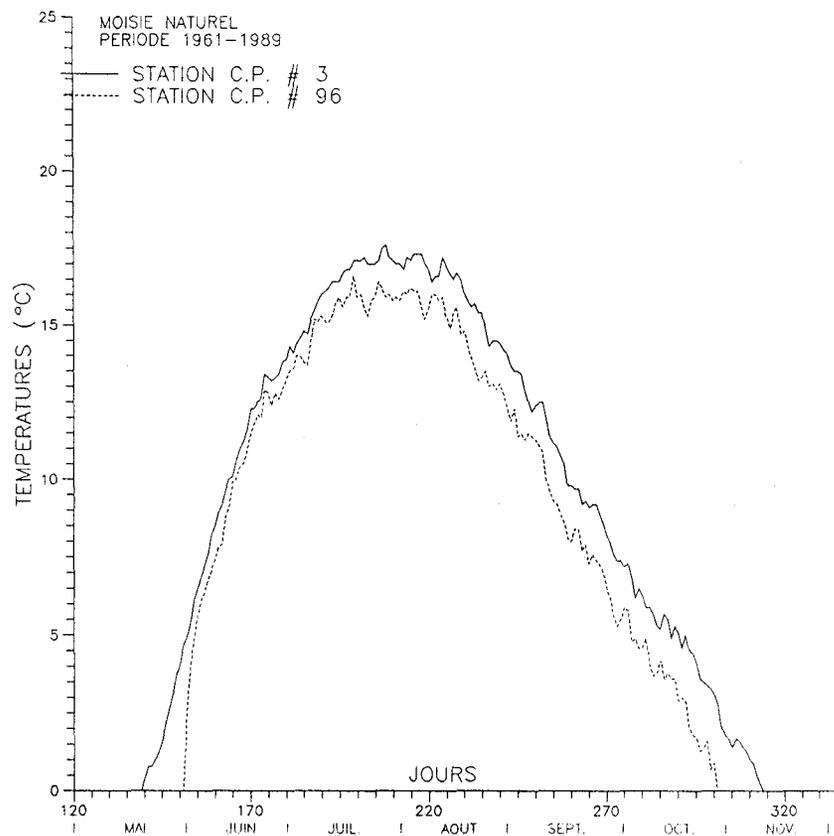
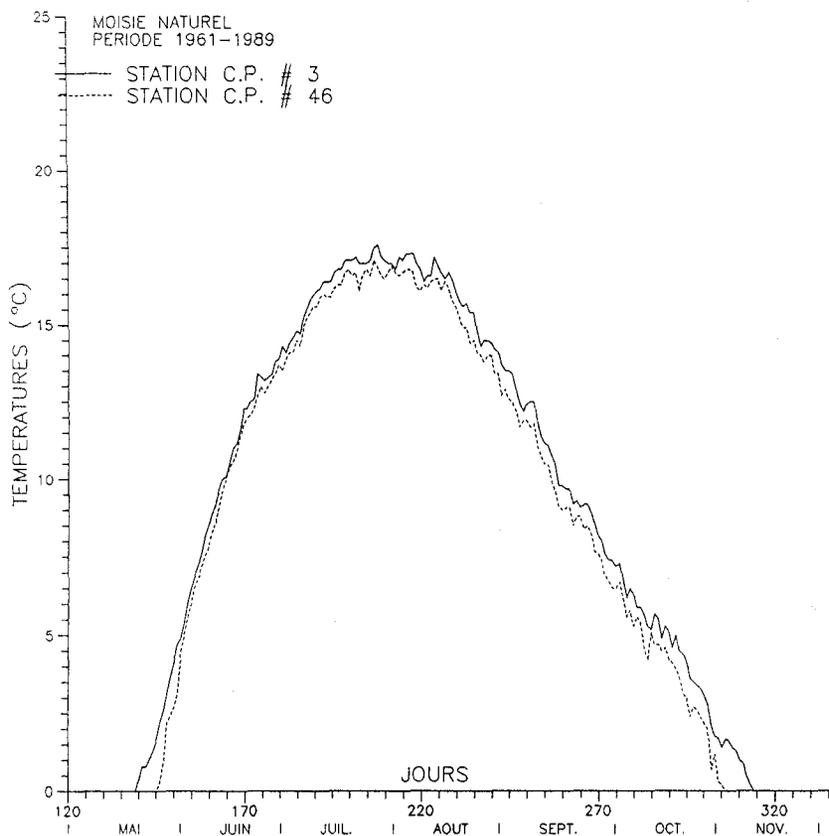


FIGURE 2.7 Températures de l'eau moyenne calculées pour la période 1961 à 1989 à: Moisie à la station 072301 (c.p. #3), Moisie à la station TMOI006 (c.p. # 46) et Aux Pékans à la station 072302 (c.p. #96).

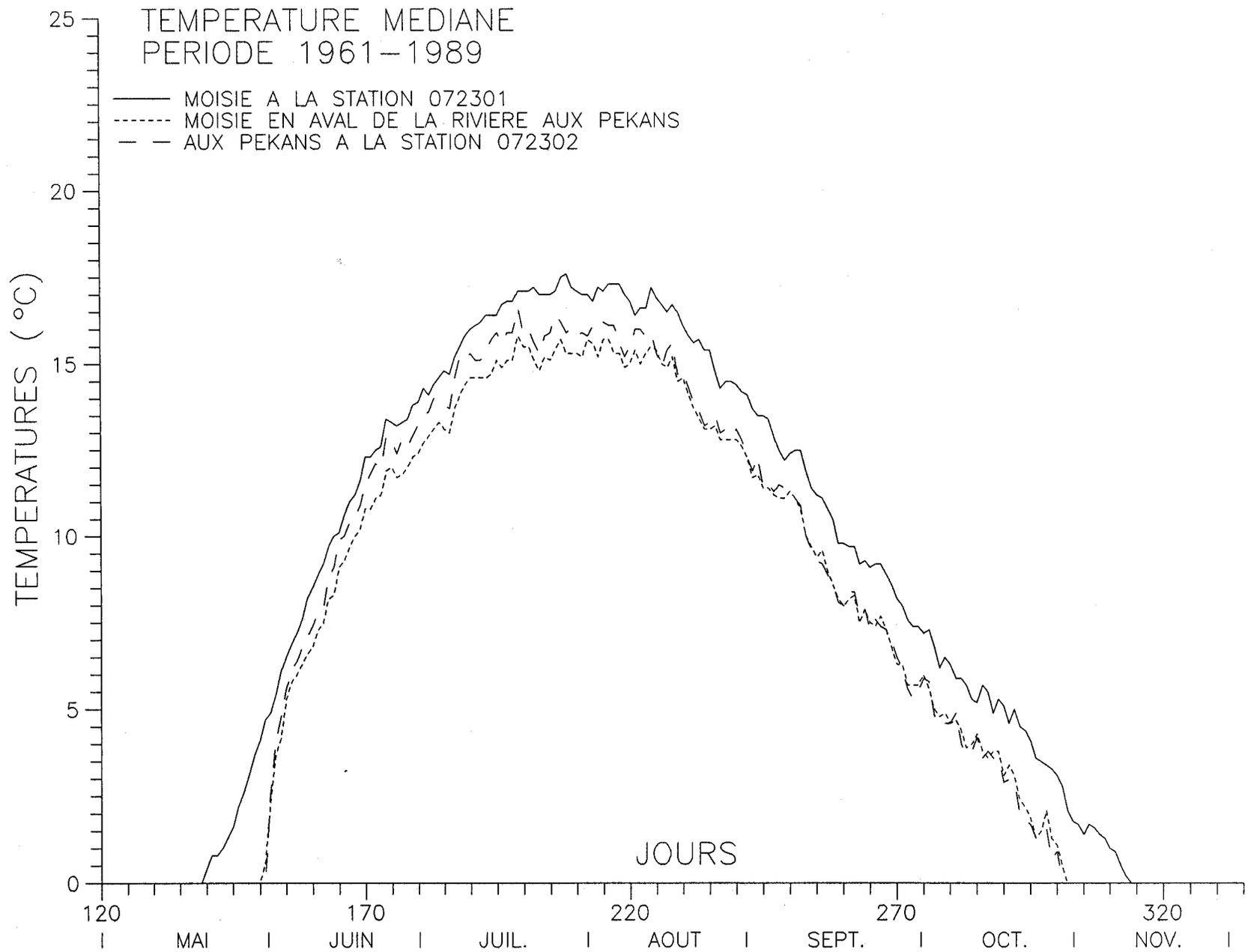


FIGURE 2.8 Températures de l'eau médiane pour la période 1961 à 1989 à: Moisie à la station 072301 (c.p. #3), Moisie en aval de la rivière Aux Pékans (c.p. #92) et Aux Pékans à la station 072302 (c.p. #96).

CHAPITRE 3

MODÉLISATION D'UNE LONGUE SÉRIE DU RÉGIME THERMIQUE DU BASSIN VERSANT NATUREL ET APRES DÉRIVATION DE LA RIVIERE MOISIE

3.1 INTRODUCTION

Les données météorologiques étant disponibles de 1961 à 1989 aux stations de Sept-Iles et Wabush, on peut utiliser le modèle calibré, pour simuler une longue série de températures de l'eau en rivière à différents points du bassin versant. Les simulations sont faites pour les cas suivants:

- reconstitution par simulation des températures de l'eau de la rivière Moisie et ses principaux tributaires pour le bassin versant naturel (conditions naturelles);
- simulation des températures de l'eau de la rivière Moisie et ses principaux tributaires après dérivation partielle des rivières aux Pékans et Carheil (sans débit réservé);
- simulation des températures de l'eau de la rivière Moisie et ses principaux tributaires après dérivation partielle des rivières aux Pékans et Carheil mais en tenant compte de la restitution vers la rivière Moisie, d'une partie de l'eau accumulée dans le réservoir aux Pékans-Carheil (avec débit réservé).

3.2 RECONSTITUTION DES TEMPÉRATURES DE L'EAU POUR LE BASSIN VERSANT NATUREL

Les températures de l'eau en rivière sont calculées à neuf sites sur la rivière Moisie et à un site sur la rivière aux Pékans. Le tableau 3.1 donne les numéros utilisés pour identifier les sites, le nom et la superficie des bassins versants naturels et après dérivation partielle des rivières aux Pékans et Carheil.

La reconstitution des températures pour le bassin versant naturel a été faite en utilisant la banque de données physiographiques et de drainage de la figure 1.3 et les données météorologiques de Sept-Iles et de Wabush pour la période 1961 à 1989.

Les résultats obtenus sont montrés sous forme de graphique pour trois des dix sites où les températures ont été calculées. Les graphiques annuels de 1961 à 1989 des

températures journalières de l'eau calculées par le modèle sont montrées à l'annexe A pour le site: Moisie à la station 072301 (c.p. #3). L'annexe B montre pour la même période les températures calculées sur la Moisie en aval de la rivière aux Pékans (c.p. #92). Les températures calculées pour la rivière aux Pékans à la station 072302 (c.p. #96) sont montrées à l'annexe C.

3.3 SIMULATION DES TEMPÉRATURES DE L'EAU POUR LE BASSIN VERSANT AMÉNAGÉ

Les températures de l'eau en rivière, sur le bassin versant de la rivière Moisie, après dérivation partielle des rivières aux Pékans et Carheil, sont calculées en utilisant les données physiographique et de drainage de la figure 1.11. Les courbes annuelles des températures de l'eau calculées sont montrées sur les graphiques des annexes A, B et C.

3.4 SIMULATION DES TEMPÉRATURES DE L'EAU POUR LE BASSIN VERSANT AMÉNAGÉ AVEC DÉBITS RÉSERVÉS

Le projet d'aménagement de la rivière Sainte-Marguerite prévoit le détournement partiel de deux tributaires de tête de la rivière Moisie, c'est-à-dire les rivières aux Pékans et Carheil. Pour minimiser les impacts environnementaux de ce détournement, les études menées à ce jour s'orientent vers une gestion multi-objective des eaux des rivières aux Pékans et Carheil. Cette gestion consiste à restituer vers la rivière Moisie, une partie de l'eau accumulée dans le réservoir aux Pékans-Carheil, pour atténuer les étiages naturels et l'effet de la dérivation sur le régime thermique de la Moisie.

Pour évaluer l'impact de cette restitution sur le régime thermique, nous avons effectué les simulations avec les données physiographiques du bassin versant aménagé (figure 1.11) et nous avons introduit, au jour le jour, une certaine quantité d'eau en amont de la rivière aux Pékans (carreau partiel 14-22-C, figure 1.11). Les quantités d'eau à restituer nous ont été fournies pour chaque jour de la période 1961 à 1989 par

Lalonde, Girouard, Letendre & Associés Limitée. Les températures de l'eau moyenne journalière (tableau 3.2) sortant du réservoir Carheil-aux Pékans pour une année calculées par le service hydraulique nous ont été fournies par la Vice-présidence Environnement d'Hydro-Québec.

Les courbes annuelles des températures de l'eau calculées en tenant compte des débits restitués sont montrées sur les graphiques des annexes A, B et C.

3.5 ANALYSE DES RÉSULTATS

L'analyse des simulations nous montre que les températures de l'eau ont des fluctuations importantes pour des périodes relativement courtes, non seulement à la période de réchauffement du printemps ou de refroidissement de l'automne, mais également en période d'été. Par exemple si on étudie les températures de l'eau calculée pour le bassin versant naturel, on observe une variation de 6,0°C à la station 072302 et de 4,3°C à la station 072301 pour une période de sept jours à la fin du mois de juin en 1967. En juillet de la même année on observe respectivement aux mêmes stations une variation de 5,8°C et de 5,3°C sur une période de neuf jours. Les graphiques des annexes A, B et C montrent des variations importantes à toutes les années simulées et en général les écarts sont plus importants en amont du bassin versant, ce qui est normal puisque les quantités d'eau disponible en rivière sont plus faibles.

L'analyse, pour une journée donnée, des températures de l'eau en rivière, pour des années différentes, montre également beaucoup de variation. Ces variations sont montrées, à huit stations, sur les figures 3.1 à 3.4 pour le bassin versant naturel, sur les figures 3.5 à 3.8 pour le bassin versant après dérivation et sur les figures 3.9 à 3.12 pour le bassin versant après dérivation mais en tenant compte de la restitution d'eau du réservoir aux Pékans-Carheil vers la rivière Moisie. Sur chaque figure, on voit les températures journalières maximales et minimales calculées pour la période 1961 à 1989. On montre également sur ces figures la température journalière médiane pour la période 1961 à 1989.

La comparaison du régime thermique à différents points du bassin versant naturel de la rivière Moisie, et après dérivation des rivières aux Pékans et Carheil, peut être faite à l'aide des figures 3.13 à 3.16. Sur ces figures on voit les températures de l'eau journalières, maximales, minimales et médianes pour le bassin versant naturel et après dérivation pour huit stations. L'analyse des résultats sur la rivière aux Pékans à la station 072302 (figure 3.16 c.p. #96) montre que les températures maximales, minimales et médianes sont plus élevées après dérivation mais non d'une façon constante durant l'année. On voit par exemple que les températures de l'eau en rivière pour le bassin versant aménagé sont plus élevées au début du mois de juin à la fin du mois d'août. Les écarts sont faibles au début et les écarts maximums sont observés pour les mois de juillet et d'août. Pour les mois de septembre on observe peu ou pas d'écart et les températures de l'eau calculées pour le bassin versant aménagé peuvent même être plus froides que celles du bassin versant naturel. Les températures de l'eau à la station 072302 après dérivation sont donc plus chaudes de 1 à 2°C durant les mois d'été.

Les figures 3.17 à 3.20 permettent de comparer le régime thermique de la rivière Moisie après dérivation partielle des rivières aux Pékans et Carheil, avec et sans débit réservé. Sur les figures 3.17 à 3.19, on voit que la restitution d'un débit à partir du réservoir aux Pékans-Carheil n'a pratiquement pas d'effet sur le régime thermique de la rivière Moisie en aval de la rivière Taoti. On observe une légère modification des températures de l'eau sur la rivière Moisie en aval de la rivière aux Pékans (figure 3.20, c.p. #92). Sur la rivière aux Pékans à la station 072302 (figure 3.20, c.p. #96), on observe une augmentation des températures minimales et médianes calculées en tenant compte du débit réservé. L'augmentation de la température médiane est observée principalement pour les mois d'août et de septembre. Sur la même figure on observe une baisse des températures maximales avec les débits réservés. Si on compare les figures 3.16 et 3.20 pour le c.p. #96, on observe l'effet régulateur du débit restitué du réservoir aux Pékans: les températures extrêmes sont rapprochées de la médiane.

L'estimation globale des changements apportés au régime thermique de la rivière Moisie, suite au détournement partiel des rivières aux Pékans et Carheil, pour différentes valeurs des températures de l'eau peut être faite en étudiant les courbes de températures classées. Les tableaux 3.3 à 3.5 donnent les valeurs de températures

classées aux dix stations définies au tableau 3.1 pour des fréquences au dépassement de 0,25 à 1,00. Les températures classées sont calculées en utilisant les températures de l'eau de tous les jours de l'année. Les jours où il y a couvert de glace on fixe la température de l'eau à 0°C. Les figures 3.21 à 3.24 montrent les courbes de températures classées pour huit stations situées sur la rivière Moisie ou aux Pékans. Les courbes de températures classées ont également été calculées en utilisant les jours où normalement il n'y a pas de couvert de glace, soit du 1^{er} mai au 30 novembre. Les résultats sont donnés aux tableaux 3.6 à 3.8 et les courbes sont présentées sur les figures 3.25 à 3.28.

L'analyse des figures 3.21 à 3.28 nous montre que le détournement partiel des rivières aux Pékans et Carheil n'a pas d'influence importante sur les températures de l'eau dans la partie aval de la rivière Moisie. Sur la figure 3.28 pour la station c.p. #92 on observe que la courbe de températures classées calculées pour le bassin versant aménagé, en tenant compte des débits réservés, est légèrement supérieure à la courbe du bassin versant naturel et aménagé sans prise en compte des restitutions du réservoir aux Pékans-Carheil. Sur la même figure pour la station c.p. #96 située sur la rivière aux Pékans, on observe que les températures de l'eau sont plus élevées après l'aménagement sauf pour les très basses températures ($< 2^{\circ}\text{C}$). Comme précédemment on observe que la courbe de températures classées est légèrement supérieure aux deux autres courbes si on tient compte des débits réservés.

Bien que le modèle thermique de la rivière Moisie donne une erreur quadratique moyenne de $1,0^{\circ}\text{C}$ pour la température de l'eau calculée par rapport à la température mesurée, les résultats sont plus précis lorsqu'on calcule les différences de température avant et après le détournement sans débit réservé car, tous les paramètres d'ajustement et les données météorologiques demeurent constants sauf le débit de la Moisie qui se trouve diminué. Ainsi, la tendance que révèle le modèle soit un léger réchauffement de l'eau de la rivière Moisie après détournement sans débit réservé est réaliste.

Par contre, le cas du détournement avec débit réservé fait appel à la température de l'eau restituée du réservoir aux Pékans. Cette température nous a été fournie par Hydro-Québec à partir d'un modèle thermique de réservoir. N'ayant pas le niveau de

précision du modèle, il n'est pas possible de qualifier, d'important ou de mineur, l'effet du débit réservé provenant du réservoir aux Pékans sur la température de l'eau en aval du réservoir et dans la rivière Moisie. Néanmoins, les résultats obtenus avec le modèle en considérant les débits réservés semblent cohérents par rapport aux conditions naturelles et de détournement sans débit réservé.

TABLEAU 3.1 Stations fictives pour le calcul des températures de l'eau en rivière pour la rivière Moisie et aux Pékans.

Numéro	Nom	Bassin versant km ² **		Position* I-J-code
		naturel	aménagé	
C.P. #1	Moisie à l'embouchure	19248	16692	17-10-A
C.P. #2	Moisie au club de pêche	19212	16656	17-11-B
C.P. #3	Moisie à la station 072301	19084	16528	17-11-A
C.P. #4	Moisie en aval de la rivière Nipissis	18840	16284	17-11-D
C.P. #26	Moisie en aval de la rivière Ouapetec	13392	10836	16-13-C
C.P. #46	Moisie à la station TMOI006	11320	8764	17-15-A
C.P. #59	Moisie en aval de la rivière Caopacho	10640	8084	16-16-C
C.P. #71	Moisie en aval de la rivière Taoti	8148	5592	16-18-A
C.P. #92	Moisie en aval de la rivière aux Pékans	6176	3620	15-21-A
C.P. #96	aux Pékans à la station 072302	3390	889	14-21-B

* Position sur les figures 1.3 ou 1.11.

** Bassins versants à la sortie du carreau partiel (c.p.).

TABLEAU 3.2 Températures de l'eau moyenne journalière (°C) sortant du réservoir Carheil-aux Pékans.

Jour	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.5	16.1	17.6	14.3	7.7	1.3	0.9
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.0	16.2	17.6	14.1	7.4	1.3	0.9
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.5	16.4	17.5	13.9	7.1	1.2	0.9
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.9	16.5	17.5	13.7	6.8	1.2	0.9
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.3	16.6	17.5	13.5	6.5	1.2	0.8
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.7	16.7	17.4	13.3	6.2	1.2	0.8
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.1	16.8	17.4	13.1	5.9	1.1	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.5	16.9	17.3	12.9	5.7	1.1	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.8	17.0	17.3	12.7	5.5	1.1	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	11.1	17.0	17.2	12.5	5.3	1.1	0.0
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	11.4	17.1	17.1	12.3	5.1	1.1	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	11.7	17.2	17.1	12.1	4.9	1.1	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	12.0	17.2	17.0	11.9	4.6	1.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	12.3	17.3	17.9	11.7	4.3	1.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	12.6	17.4	16.8	11.5	4.0	1.0	0.0
16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	12.9	17.4	16.7	11.3	3.8	1.0	0.0
17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	13.3	17.5	16.6	11.0	3.6	1.0	0.0
18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	13.6	17.5	16.4	10.7	3.4	1.0	0.0
19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	13.8	17.6	16.2	10.5	3.2	1.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	14.0	17.6	16.0	10.2	3.0	1.0	0.0
21	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	14.2	17.6	15.9	9.9	2.8	1.0	0.0
22	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	14.4	17.6	15.8	9.7	2.6	1.0	0.0
23	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	14.6	17.6	15.6	9.5	2.4	1.0	0.0
24	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	14.8	17.6	15.4	9.3	2.2	1.0	0.0
25	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	15.0	17.6	15.3	9.0	1.9	1.0	0.0
26	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5	15.2	17.7	15.1	8.8	1.8	1.0	0.0
27	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	15.3	17.7	14.9	8.6	1.7	1.0	0.0
28	0.0	0.0	0.0	0.0	5.5	15.5	17.7	14.8	8.4	1.6	1.0	0.0
29	0.0		0.0	0.0	6.0	15.7	17.7	14.7	8.2	1.5	1.0	0.0
30	0.0		0.0	0.0	6.5	15.9	17.6	14.6	7.9	1.4	0.9	0.0
31	0.0		0.0		7.0		17.6	14.5		1.4		0.0

TABLEAU 3.3 Températures journalières (°C) classées pour le bassin versant naturel de la rivière Moisie pour tous les jours de l'année de la période 1961 à 1989.

Fréquence au dépassement	C.P. #1	C.P. #2	C.P. #3	C.P. #4	C.P. #26	C.P. #46	C.P. #59	C.P. #71	C.P. #92	C.P. #96
0.025	19.01	18.37	18.35	18.29	18.01	18.02	17.92	17.46	17.01	17.86
0.050	18.12	17.47	17.46	17.38	17.26	17.24	17.10	16.65	16.07	16.66
0.075	17.45	16.80	16.80	16.70	16.52	16.45	16.28	15.84	15.13	15.61
0.100	16.78	16.13	16.13	16.02	15.77	15.67	15.46	15.04	14.36	14.89
0.125	16.10	15.46	15.46	15.33	14.96	14.84	14.68	14.27	13.64	14.16
0.150	15.21	14.58	14.58	14.46	14.11	14.02	13.90	13.50	12.91	13.42
0.175	14.28	13.70	13.70	13.59	13.26	13.17	13.09	12.68	12.10	12.55
0.200	13.31	12.76	12.77	12.67	12.37	12.27	12.18	11.77	11.27	11.67
0.225	12.27	11.76	11.77	11.71	11.48	11.37	11.23	10.80	10.35	10.67
0.250	11.23	10.75	10.76	10.66	10.42	10.26	10.10	9.74	9.38	9.61
0.275	10.18	9.72	9.72	9.55	9.32	9.11	8.96	8.59	8.15	8.41
0.300	9.09	8.65	8.66	8.52	8.20	7.99	7.84	7.50	7.09	7.26
0.325	7.93	7.48	7.48	7.42	7.02	6.89	6.70	6.40	5.99	6.13
0.350	6.80	6.37	6.37	6.26	5.81	5.64	5.46	5.12	4.77	4.83
0.375	5.75	5.23	5.24	5.21	4.70	4.55	4.32	3.93	3.51	3.52
0.400	4.68	4.16	4.15	4.06	3.51	3.27	3.03	2.63	2.18	2.05
0.425	3.33	2.87	2.87	2.75	2.06	1.65	1.41	0.77	0.00	0.00
0.450	1.93	1.37	1.36	1.17	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.475	0.53	0.10	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.500	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.525	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.550	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.575	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.600	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.625	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.650	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.675	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.700	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.725	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.750	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.775	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.800	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.825	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.850	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.875	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.900	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.925	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.950	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.975	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

TABLEAU 3.4 Températures journalières (°C) classées pour le bassin versant aménagé de la rivière Moisie pour tous les jours de l'année de la période 1961 à 1989.

Fréquence au dépassement	C.P. #1	C.P. #2	C.P. #3	C.P. #4	C.P. #26	C.P. #46	C.P. #59	C.P. #71	C.P. #92	C.P. #96
0.025	19.09	18.31	18.36	18.40	18.14	18.29	18.22	17.74	17.05	19.15
0.050	18.27	17.59	17.60	17.46	17.41	17.44	17.32	16.85	16.11	17.95
0.075	17.60	16.93	16.94	16.78	16.68	16.60	16.43	15.96	15.17	16.79
0.100	16.93	16.27	16.28	16.10	15.95	15.76	15.58	15.14	14.40	15.98
0.125	16.27	15.61	15.62	15.41	15.16	14.96	14.82	14.39	13.67	15.16
0.150	15.38	14.73	14.74	14.53	14.30	14.17	14.05	13.64	12.94	14.33
0.175	14.45	13.85	13.85	13.66	13.45	13.37	13.25	12.83	12.14	13.41
0.200	13.48	12.91	12.91	12.74	12.53	12.50	12.37	11.93	11.32	12.48
0.225	12.44	11.91	11.89	11.78	11.61	11.64	11.46	10.99	10.41	11.51
0.250	11.38	10.89	10.88	10.78	10.55	10.43	10.29	9.95	9.43	10.52
0.275	10.30	9.86	9.86	9.75	9.46	9.27	9.15	8.84	8.25	9.18
0.300	9.23	8.80	8.79	8.70	8.36	8.19	8.05	7.65	7.17	8.01
0.325	8.13	7.68	7.68	7.55	7.27	7.10	6.92	6.50	6.03	6.77
0.350	6.99	6.54	6.53	6.41	6.00	5.81	5.65	5.19	4.80	5.28
0.375	5.87	5.41	5.41	5.26	4.90	4.67	4.48	4.03	3.50	3.74
0.400	4.78	4.39	4.36	4.17	3.68	3.40	3.18	2.75	2.13	1.92
0.425	3.48	2.91	2.93	2.85	2.19	1.81	1.49	0.76	0.00	0.00
0.450	2.05	1.39	1.39	1.22	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.475	0.48	0.10	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.500	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.525	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.550	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.575	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.600	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.625	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.650	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.675	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.700	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.725	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.750	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.775	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.800	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.825	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.850	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.875	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.900	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.925	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.950	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.975	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

TABLEAU 3.5 Températures journalières (°C) classées pour le bassin versant aménagé de la rivière Moisie avec débits réservés pour tous les jours de l'année de la période 1961 à 1989.

Fréquence au dépassement	C.P. #1	C.P. #2	C.P. #3	C.P. #4	C.P. #26	C.P. #46	C.P. #59	C.P. #71	C.P. #92	C.P. #96
0.025	19.30	18.57	18.58	18.51	18.10	18.10	18.02	17.52	17.00	18.75
0.050	18.21	17.53	17.54	17.45	17.34	17.35	17.26	16.75	16.20	17.85
0.075	17.53	16.87	16.87	16.78	16.62	16.59	16.49	15.97	15.49	16.96
0.100	16.85	16.21	16.21	16.11	15.90	15.83	15.73	15.20	14.77	16.17
0.125	16.17	15.55	15.55	15.44	15.12	15.04	14.92	14.43	14.04	15.44
0.150	15.31	14.70	14.69	14.58	14.27	14.22	14.09	13.67	13.29	14.71
0.175	14.39	13.81	13.81	13.71	13.42	13.41	13.26	12.91	12.54	13.92
0.200	13.45	12.89	12.88	12.79	12.52	12.51	12.35	12.02	11.64	12.96
0.225	12.43	11.89	11.89	11.81	11.61	11.59	11.44	11.13	10.70	12.00
0.250	11.39	10.88	10.88	10.79	10.57	10.46	10.35	10.03	9.6	11.00
0.275	10.30	9.86	9.86	9.71	9.47	9.28	9.21	8.87	8.55	9.84
0.300	9.24	8.80	8.80	8.66	8.37	8.16	8.07	7.71	7.38	8.46
0.325	8.13	7.66	7.66	7.57	7.22	7.11	6.90	6.58	6.18	7.12
0.350	6.96	6.53	6.53	6.41	6.04	5.80	5.70	5.35	4.81	5.54
0.375	5.90	5.38	5.38	5.33	4.87	4.67	4.50	4.06	3.54	3.93
0.400	4.81	4.34	4.32	4.19	3.65	3.43	3.23	2.73	2.18	2.10
0.425	3.45	2.98	2.99	2.83	2.20	1.78	1.57	0.82	0.00	0.00
0.450	2.03	1.44	1.44	1.22	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.475	0.48	0.10	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.500	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.525	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.550	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.575	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.600	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.625	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.650	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.675	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.700	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.725	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.750	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.775	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.800	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.825	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.850	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.875	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.900	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.925	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.950	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.975	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

TABLEAU 3.6 Températures journalières (°C) classées pour le bassin versant naturel de la rivière Moisie du 1^{er} mai au 30 novembre de la période 1961 à 1989.

Fréquence au dépassement	C.P. #1	C.P. #2	C.P. #3	C.P. #4	C.P. #26	C.P. #46	C.P. #59	C.P. #71	C.P. #92	C.P. #96
0.025	20.21	19.50	19.49	19.41	19.19	18.86	18.72	18.12	17.39	18.35
0.050	18.68	18.02	18.02	17.94	17.88	17.89	17.78	17.32	16.84	17.65
0.075	18.29	17.63	17.63	17.54	17.44	17.43	17.30	16.85	16.29	16.95
0.100	17.89	17.24	17.23	17.14	17.01	16.97	16.82	16.37	15.74	16.26
0.125	17.50	16.85	16.84	16.75	16.57	16.51	16.34	15.90	15.19	15.66
0.150	17.10	16.46	16.45	16.35	16.13	16.05	15.86	15.42	14.71	15.24
0.175	16.71	16.06	16.06	15.95	15.69	15.59	15.38	14.96	14.29	14.81
0.200	16.31	15.67	15.67	15.56	15.23	15.10	14.93	14.51	13.86	14.39
0.225	15.88	15.22	15.22	15.10	14.73	14.62	14.47	14.06	13.44	13.97
0.250	15.34	14.71	14.70	14.58	14.23	14.13	14.01	13.61	13.01	13.54
0.275	14.79	14.19	14.19	14.07	13.74	13.65	13.56	13.16	12.55	13.03
0.300	14.25	13.67	13.67	13.56	13.24	13.14	13.07	12.66	12.07	12.52
0.325	13.70	13.14	13.15	13.04	12.72	12.62	12.53	12.12	11.59	12.01
0.350	13.10	12.56	12.57	12.47	12.19	12.09	11.99	11.58	11.10	11.48
0.375	12.49	11.97	11.98	11.91	11.67	11.57	11.45	11.03	10.56	10.89
0.400	11.89	11.39	11.40	11.35	11.11	10.95	10.81	10.41	9.99	10.29
0.425	11.27	10.79	10.80	10.70	10.46	10.30	10.14	9.78	9.42	9.66
0.450	10.65	10.18	10.19	10.04	9.82	9.65	9.48	9.12	8.71	8.96
0.475	10.04	9.58	9.58	9.41	9.17	8.96	8.81	8.43	8.00	8.26
0.500	9.40	8.95	8.96	8.81	8.52	8.28	8.15	7.79	7.38	7.59
0.525	8.76	8.33	8.34	8.20	7.84	7.67	7.51	7.18	6.76	6.92
0.550	8.06	7.61	7.62	7.54	7.15	7.04	6.83	6.53	6.12	6.26
0.575	7.35	6.92	6.92	6.87	6.44	6.27	6.10	5.83	5.41	5.50
0.600	6.74	6.30	6.30	6.18	5.74	5.57	5.39	5.05	4.70	4.75
0.625	6.12	5.64	5.65	5.57	5.07	4.92	4.73	4.37	3.95	4.04
0.650	5.50	5.00	5.00	4.94	4.46	4.23	4.00	3.62	3.24	3.20
0.675	4.87	4.40	4.39	4.26	3.71	3.48	3.30	2.87	2.45	2.37
0.700	4.17	3.64	3.63	3.58	3.04	2.64	2.49	1.88	1.27	0.96
0.725	3.34	2.88	2.88	2.76	2.08	1.68	1.43	0.79	0.00	0.00
0.750	2.61	1.91	1.91	1.72	1.05	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00
0.775	1.73	1.13	1.12	0.85	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.800	0.99	0.40	0.39	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.825	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.850	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.875	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.900	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.925	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.950	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.975	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

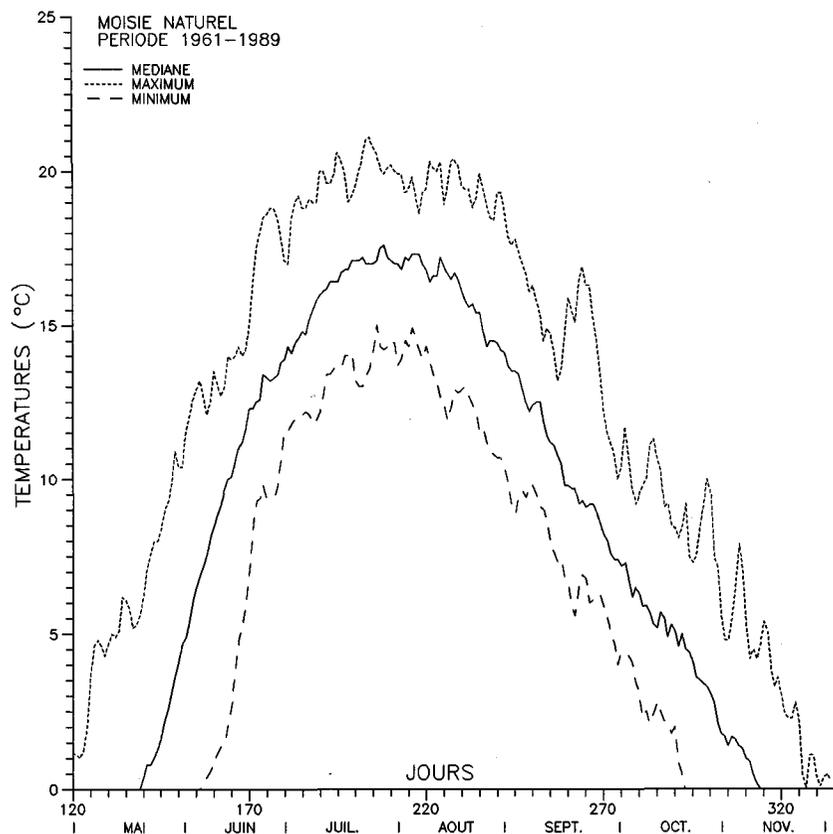
TABLEAU 3.7 Températures journalières (°C) classées pour le bassin versant aménagé de la rivière Moisie du 1^{er} mai au 30 novembre de la période 1961 à 1989.

Fréquence au dépassement	C.P. #1	C.P. #2	C.P. #3	C.P. #4	C.P. #26	C.P. #46	C.P. #59	C.P. #71	C.P. #92	C.P. #96
0.025	20.33	19.55	19.58	19.52	19.26	19.23	19.00	18.31	17.43	19.65
0.050	18.83	18.13	18.15	18.03	18.02	18.14	18.06	17.59	16.88	18.95
0.075	18.44	17.75	17.76	17.63	17.59	17.65	17.54	17.07	16.34	18.24
0.100	18.04	17.36	17.37	17.23	17.16	17.15	17.02	16.55	15.79	17.54
0.125	17.65	16.97	16.99	16.83	16.74	16.66	16.49	16.03	15.24	16.85
0.150	17.26	16.59	16.60	16.43	16.31	16.16	15.97	15.51	14.75	16.37
0.175	16.87	16.20	16.22	16.03	15.88	15.67	15.50	15.06	14.32	15.89
0.200	16.47	15.82	15.83	15.63	15.43	15.21	15.05	14.62	13.90	15.42
0.225	16.05	15.37	15.39	15.17	14.93	14.75	14.61	14.19	13.47	14.94
0.250	15.51	14.85	14.87	14.66	14.42	14.28	14.16	13.75	13.05	14.46
0.275	14.96	14.34	14.35	14.15	13.92	13.82	13.71	13.31	12.60	13.92
0.300	14.42	13.82	13.82	13.64	13.42	13.34	13.23	12.80	12.11	13.38
0.325	13.87	13.29	13.30	13.11	12.89	12.83	12.71	12.27	11.63	12.84
0.350	13.27	12.71	12.70	12.55	12.34	12.33	12.19	11.75	11.15	12.29
0.375	12.66	12.12	12.11	11.98	11.80	11.82	11.67	11.21	10.61	11.72
0.400	12.05	11.53	11.52	11.41	11.23	11.20	11.02	10.60	10.04	11.14
0.425	11.43	10.93	10.92	10.82	10.59	10.47	10.33	9.99	9.47	10.56
0.450	10.79	10.33	10.32	10.22	9.96	9.77	9.66	9.35	8.79	9.79
0.475	10.16	9.72	9.73	9.61	9.32	9.13	9.00	8.69	8.09	9.01
0.500	9.53	9.10	9.09	9.00	8.67	8.49	8.35	8.00	7.47	8.33
0.525	8.91	8.47	8.46	8.38	8.03	7.87	7.73	7.27	6.85	7.66
0.550	8.26	7.81	7.80	7.69	7.39	7.24	7.07	6.62	6.16	6.91
0.575	7.59	7.14	7.14	6.99	6.66	6.46	6.29	5.96	5.46	6.09
0.600	6.92	6.47	6.46	6.34	5.93	5.73	5.57	5.12	4.72	5.18
0.625	6.25	5.80	5.80	5.67	5.31	5.06	4.89	4.47	3.94	4.32
0.650	5.61	5.16	5.16	5.01	4.63	4.39	4.18	3.73	3.24	3.34
0.675	4.97	4.59	4.57	4.40	3.89	3.63	3.39	2.98	2.42	2.30
0.700	4.29	3.83	3.81	3.65	3.17	2.82	2.64	2.04	1.22	0.33
0.725	3.49	2.93	2.95	2.86	2.20	1.83	1.51	0.77	0.00	0.00
0.750	2.74	2.01	2.01	1.82	1.05	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00
0.775	1.85	1.09	1.09	0.93	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.800	0.99	0.42	0.39	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.825	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.850	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.875	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.900	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.925	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.950	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.975	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

TABLEAU 3.8 Températures journalières (°C) classées pour le bassin versant aménagé de la rivière Moisie avec débits réservés du 1^{er} mai au 30 novembre de la période 1961 à 1989.

Fréquence au dépassement	C.P. #1	C.P. #2	C.P. #3	C.P. #4	C.P. #26	C.P. #46	C.P. #59	C.P. #71	C.P. #92	C.P. #96
0.025	20.38	19.62	19.63	19.54	19.34	19.31	19.22	18.57	18.12	19.12
0.050	18.86	18.13	18.15	18.09	17.94	17.97	17.89	17.39	16.79	18.59
0.075	18.37	17.69	17.70	17.61	17.52	17.53	17.44	16.94	16.37	18.07
0.100	17.97	17.31	17.31	17.22	17.10	17.09	16.99	16.48	15.95	17.55
0.125	17.58	16.92	16.92	16.83	16.67	16.64	16.54	16.03	15.54	17.02
0.150	17.18	16.53	16.53	16.44	16.25	16.20	16.10	15.57	15.12	16.52
0.175	16.78	16.15	16.15	16.04	15.82	15.75	15.65	15.12	14.70	16.09
0.200	16.39	15.76	15.76	15.65	15.39	15.29	15.18	14.67	14.27	15.67
0.225	15.98	15.34	15.34	15.22	14.89	14.81	14.69	14.22	13.83	15.24
0.250	15.44	14.82	14.82	14.71	14.39	14.34	14.20	13.78	13.39	14.81
0.275	14.90	14.31	14.30	14.19	13.89	13.86	13.72	13.33	12.95	14.39
0.300	14.36	13.79	13.78	13.68	13.40	13.38	13.23	12.88	12.51	13.89
0.325	13.82	13.27	13.26	13.16	12.87	12.86	12.70	12.36	12.00	13.33
0.350	13.24	12.69	12.68	12.59	12.34	12.32	12.17	11.84	11.45	12.77
0.375	12.64	12.10	12.10	12.02	11.80	11.78	11.64	11.31	10.90	12.21
0.400	12.05	11.52	11.52	11.45	11.26	11.21	11.05	10.72	10.32	11.63
0.425	11.43	10.92	10.92	10.83	10.61	10.50	10.39	10.07	9.70	11.04
0.450	10.80	10.32	10.32	10.20	9.96	9.80	9.73	9.41	9.09	10.46
0.475	10.16	9.72	9.72	9.57	9.32	9.13	9.06	8.71	8.40	9.66
0.500	9.54	9.10	9.10	8.96	8.68	8.46	8.39	8.01	7.71	8.82
0.525	8.92	8.47	8.48	8.34	8.02	7.84	7.71	7.38	7.02	8.06
0.550	8.26	7.79	7.79	7.69	7.35	7.23	7.03	6.72	6.32	7.28
0.575	7.55	7.08	7.08	7.03	6.66	6.47	6.36	5.99	5.57	6.43
0.600	6.90	6.47	6.46	6.34	5.97	5.73	5.61	5.27	4.73	5.44
0.625	6.28	5.81	5.81	5.69	5.28	5.06	4.89	4.51	3.98	4.53
0.650	5.64	5.12	5.12	5.07	4.59	4.40	4.16	3.76	3.26	3.53
0.675	5.01	4.55	4.53	4.39	3.86	3.62	3.43	3.03	2.48	2.42
0.700	4.30	3.79	3.78	3.73	3.17	2.79	2.67	2.01	1.25	0.82
0.725	3.46	3.00	3.01	2.85	2.22	1.80	1.59	0.83	0.00	0.00
0.750	2.71	2.00	1.99	1.80	1.12	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00
0.775	1.84	1.19	1.19	0.93	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.800	0.98	0.42	0.39	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.825	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.850	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.875	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.900	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.925	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.950	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.975	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

STATION C.P. # 3



STATION C.P. # 4

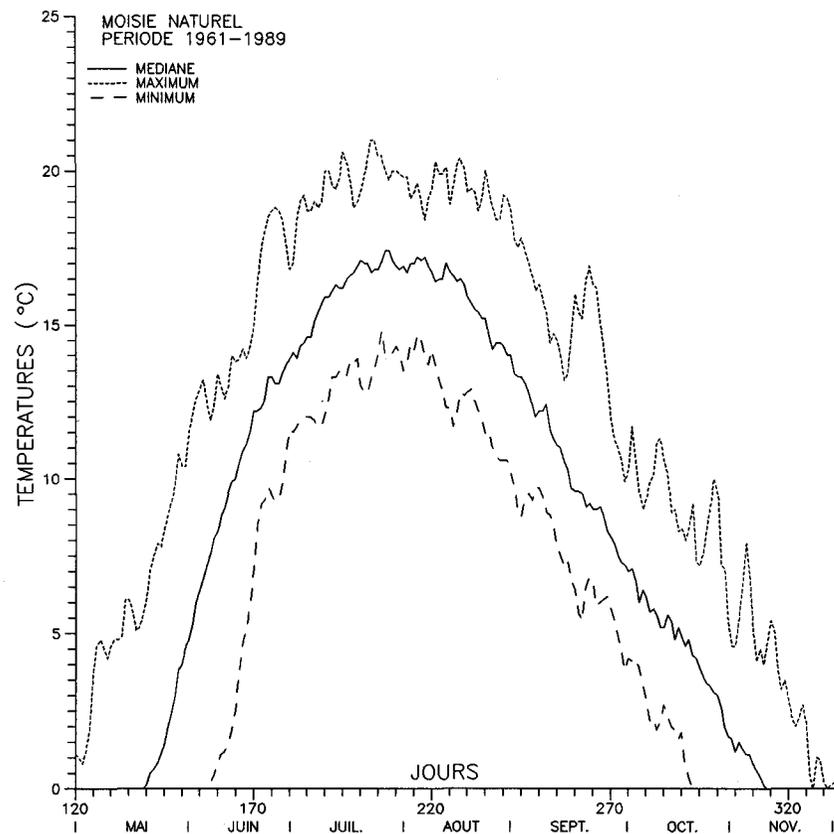
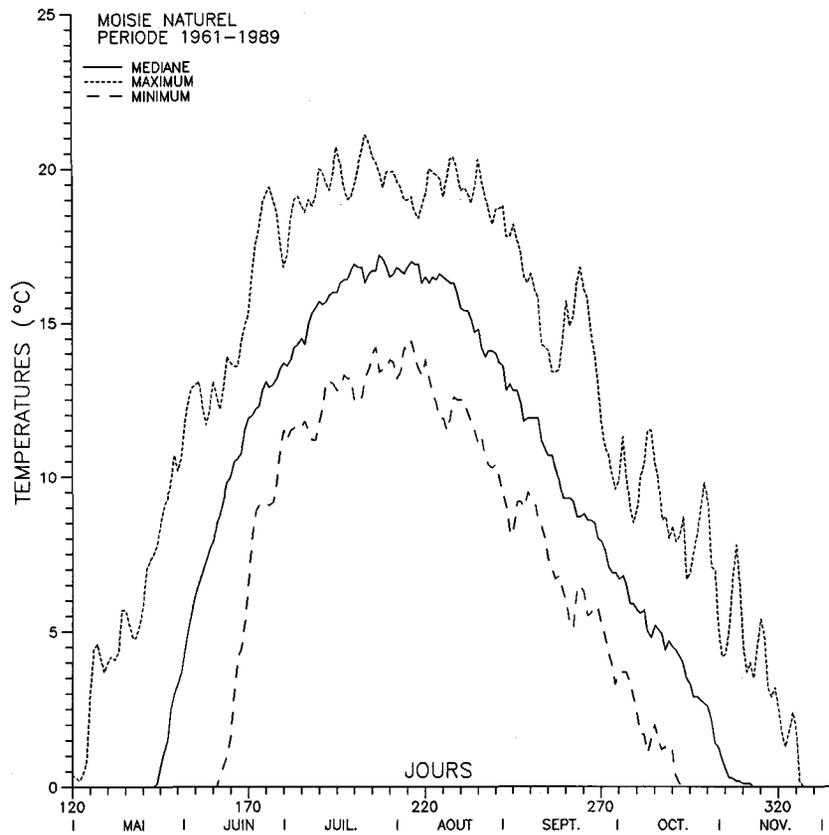


Figure 3.1 Températures journalières maximales, minimales et médianes calculées avec le bassin versant naturel pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #3 et c.p. #4.

STATION C.P. # 26



STATION C.P. # 46

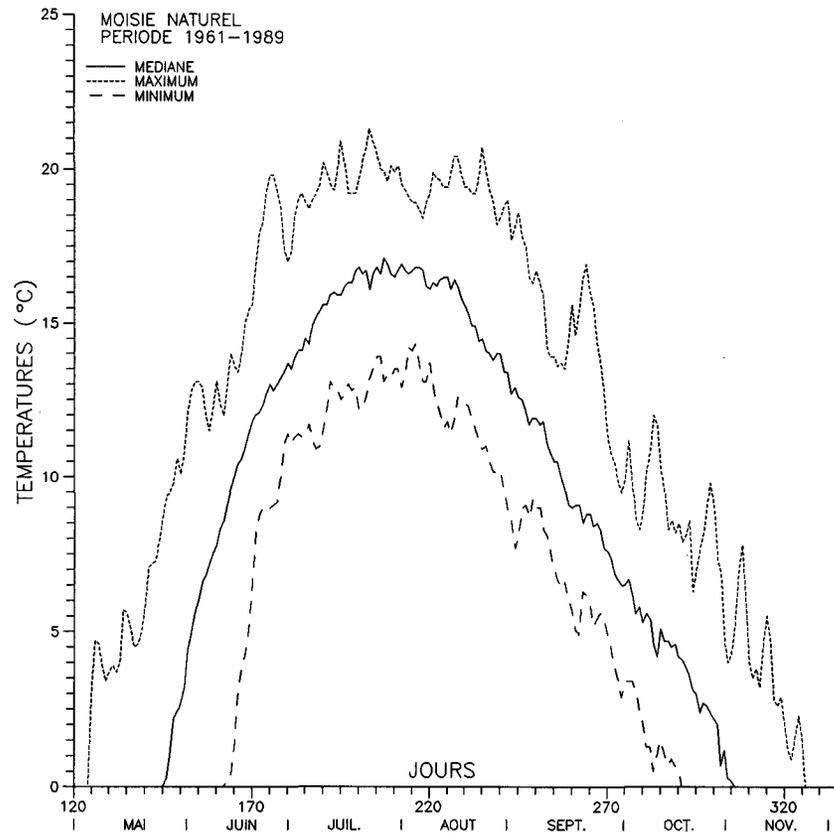
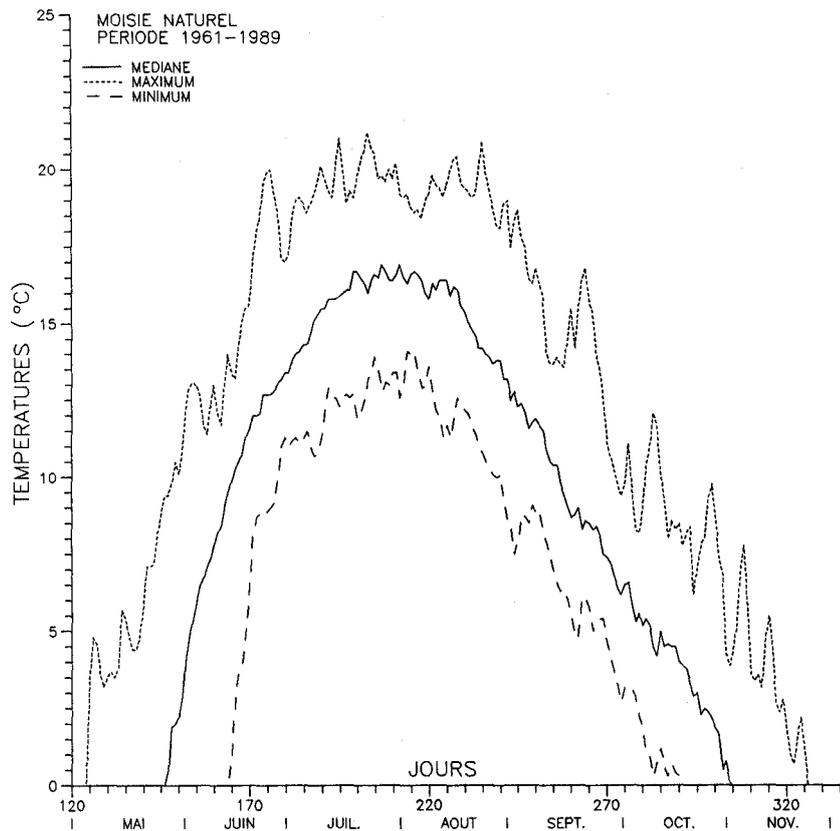


Figure 3.2 Températures journalières maximales, minimales et médianes calculées avec le bassin versant naturel pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #26 et c.p. #46.

STATION C.P. # 59



STATION C.P. # 71

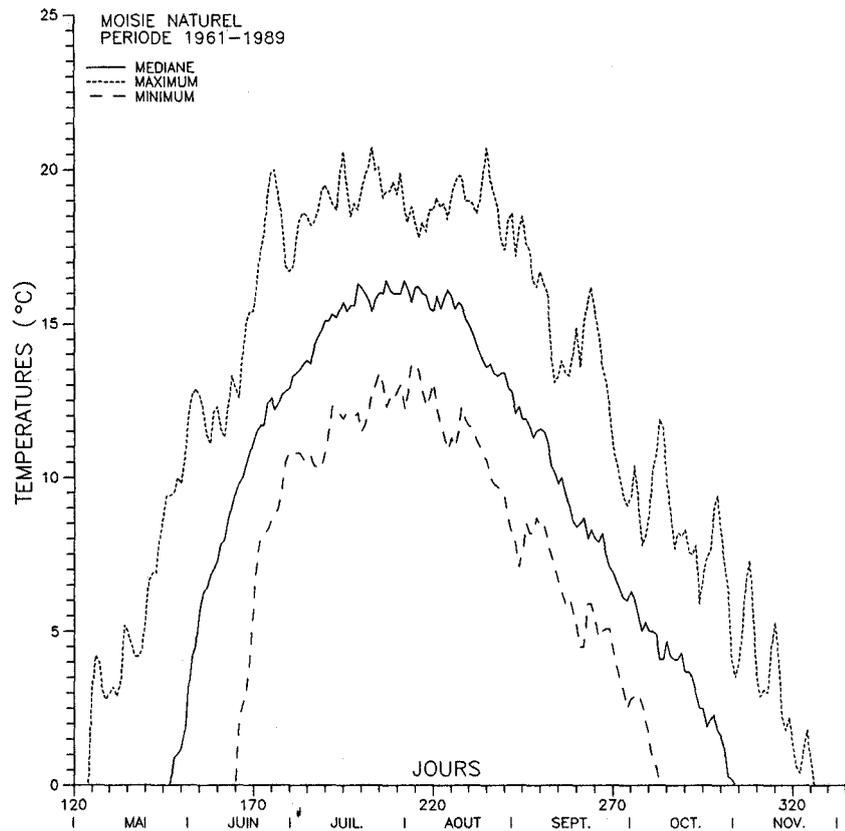
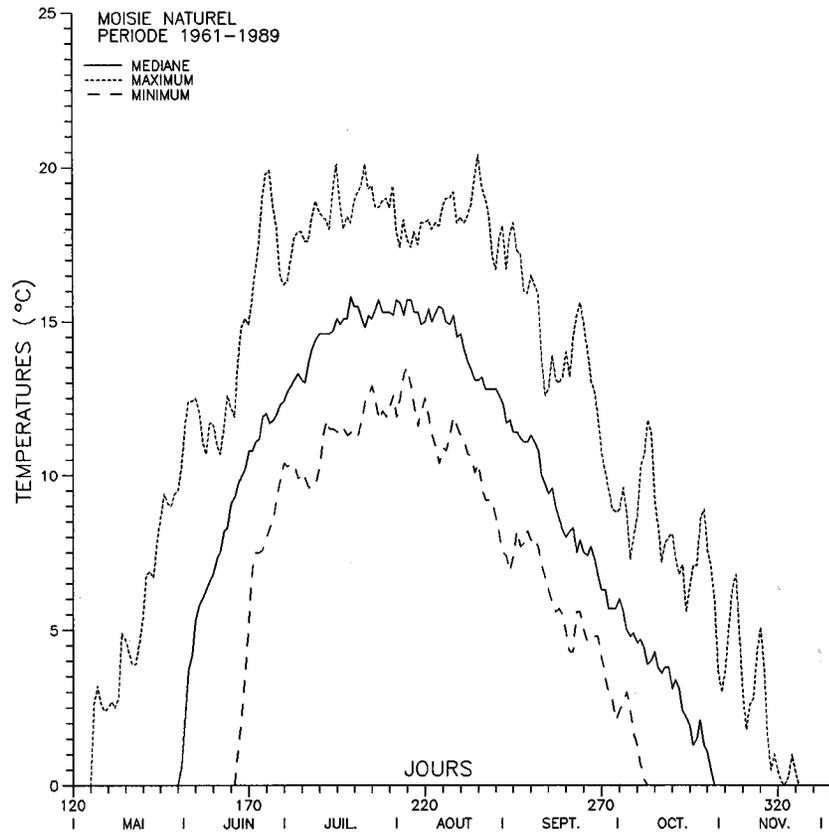


Figure 3.3 Températures journalières maximales, minimales et médianes calculées avec le bassin versant naturel pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #59 et c.p. #71.

STATION C.P. # 92



STATION C.P. # 96

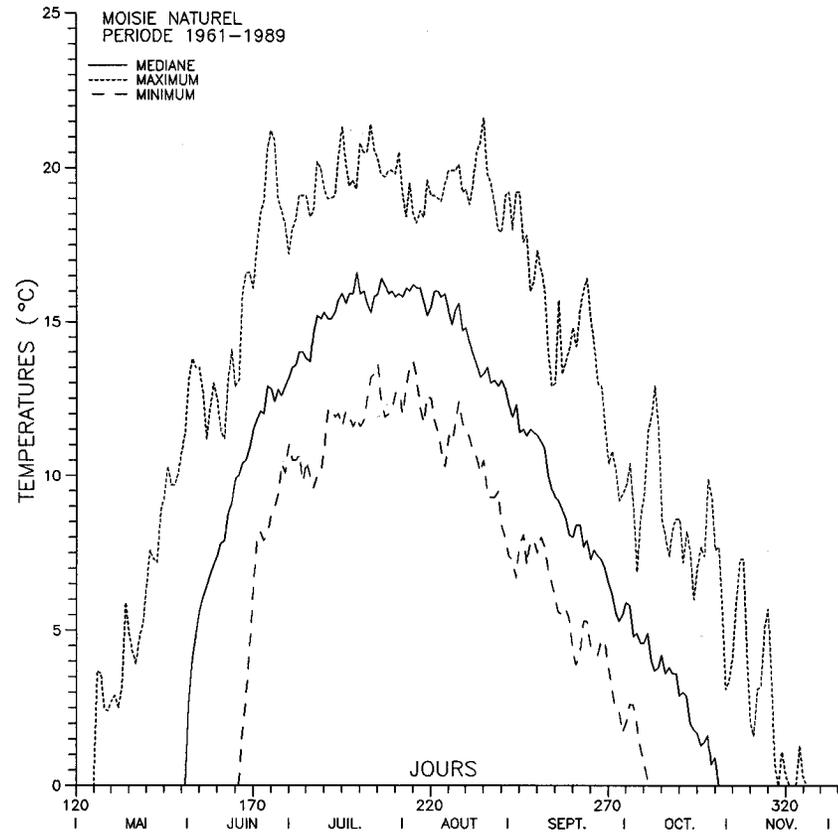
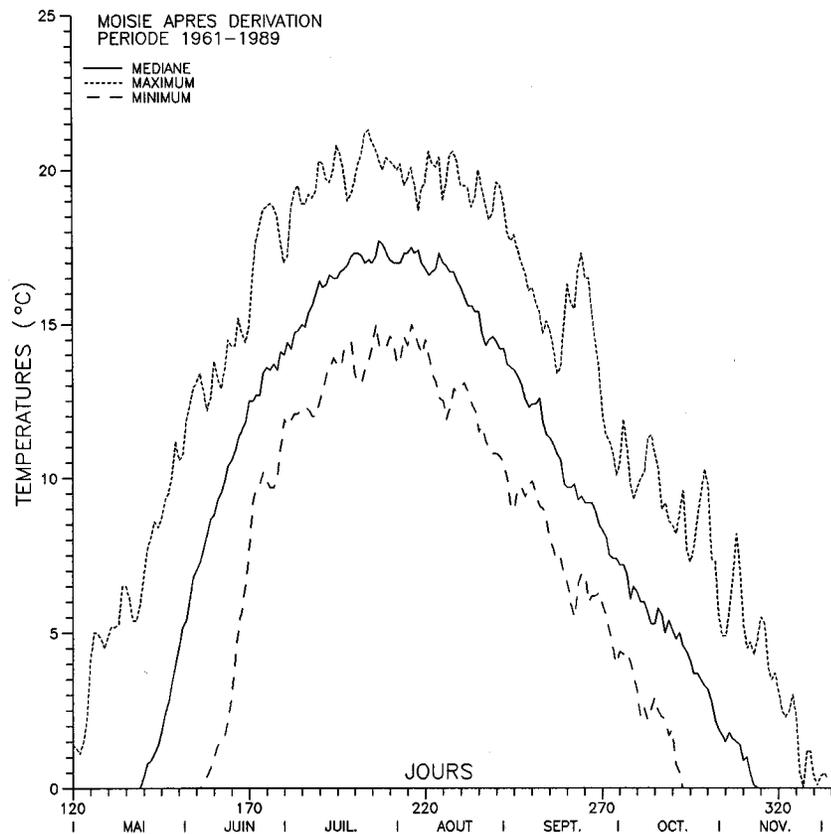


Figure 3.4 Températures journalières maximales, minimales et médianes calculées avec le bassin versant naturel pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #92 et c.p. #96.

STATION C.P. # 3



STATION C.P. # 4

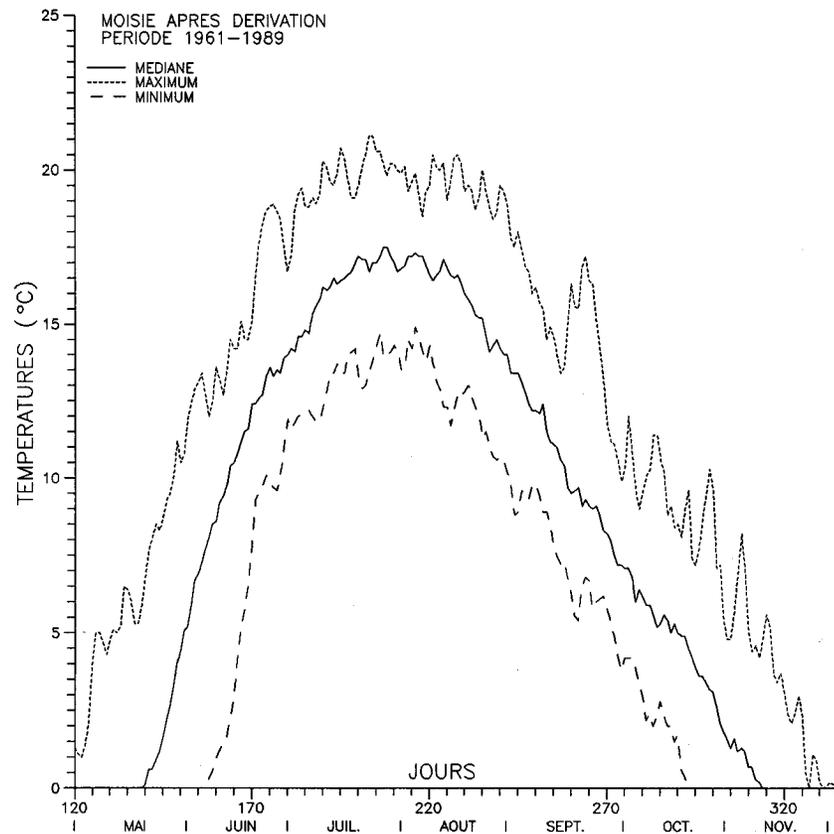
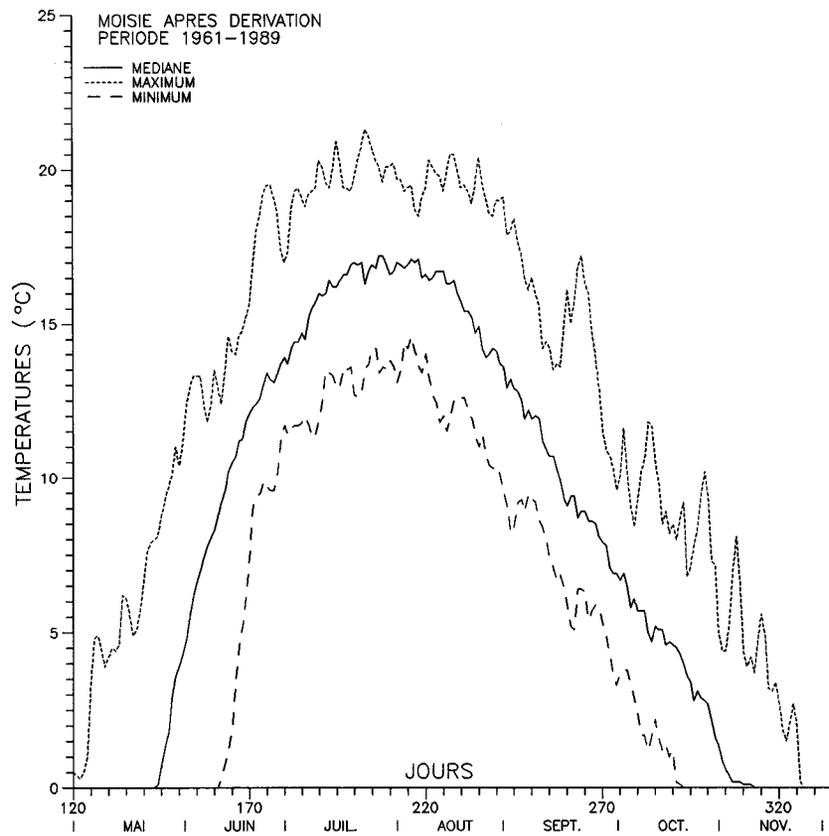


Figure 3.5 Températures journalières maximales, minimales et médianes calculées après dérivation partielle des rivières Aux Pékans et Carheil pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #3 et c.p. #4.

STATION C.P. # 26



STATION C.P. # 46

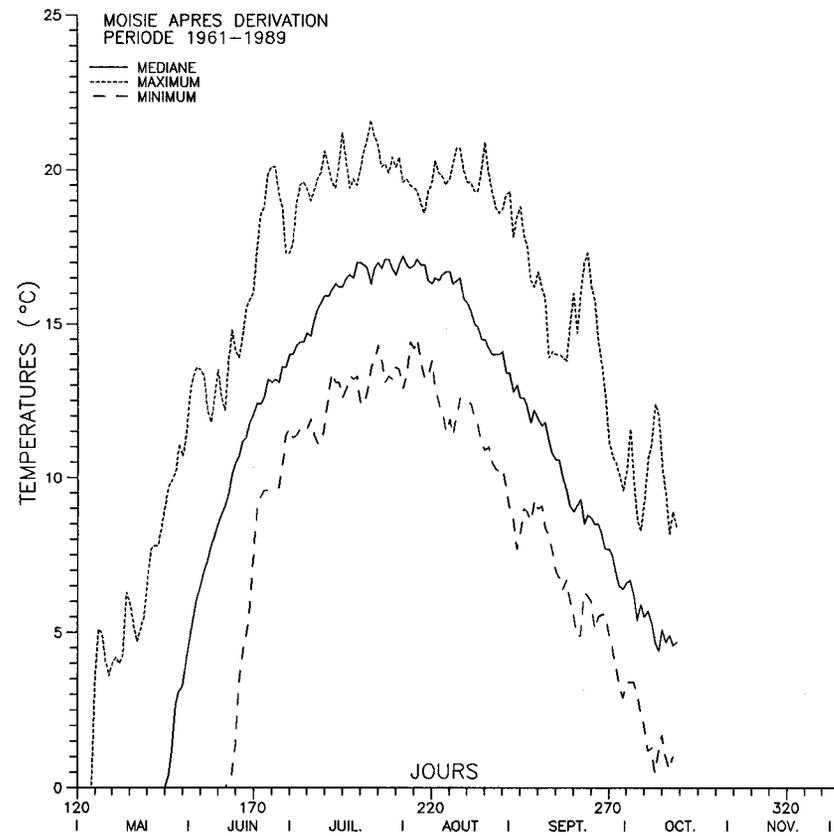
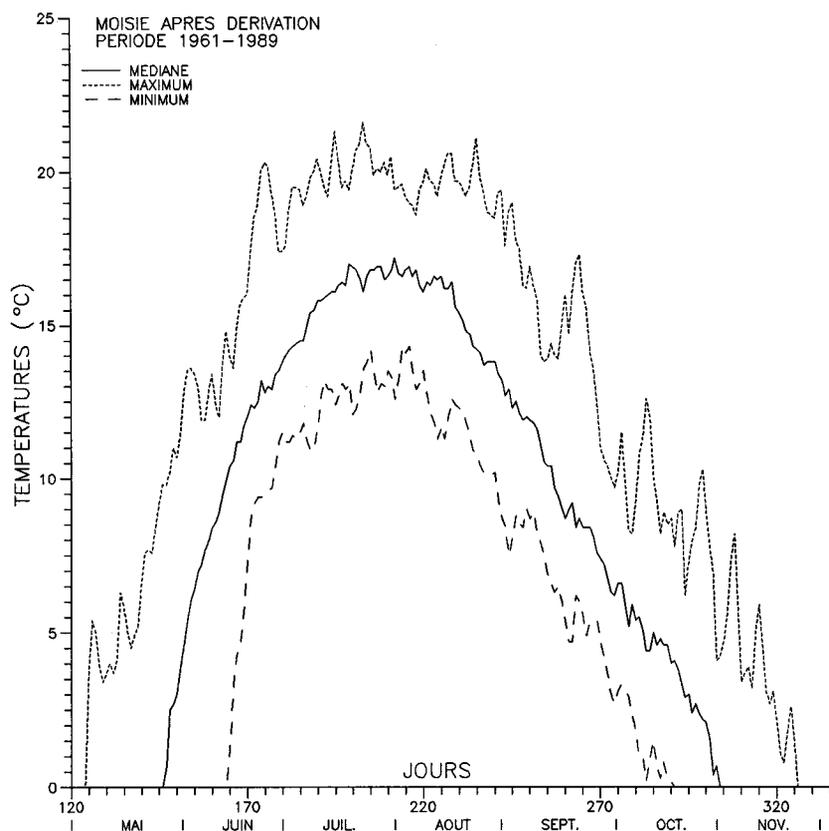


Figure 3.6 Températures journalières maximales, minimales et médianes calculées après dérivation partielle des rivières Aux Pékans et Carheil pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #26 et c.p. #46.

STATION C.P. # 59



STATION C.P. # 71

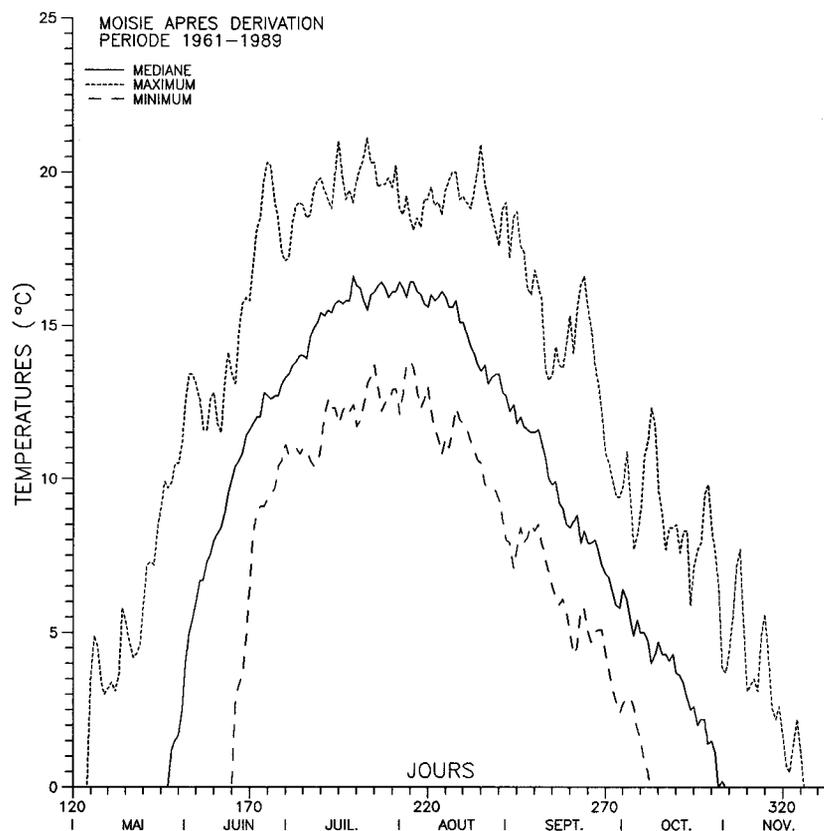
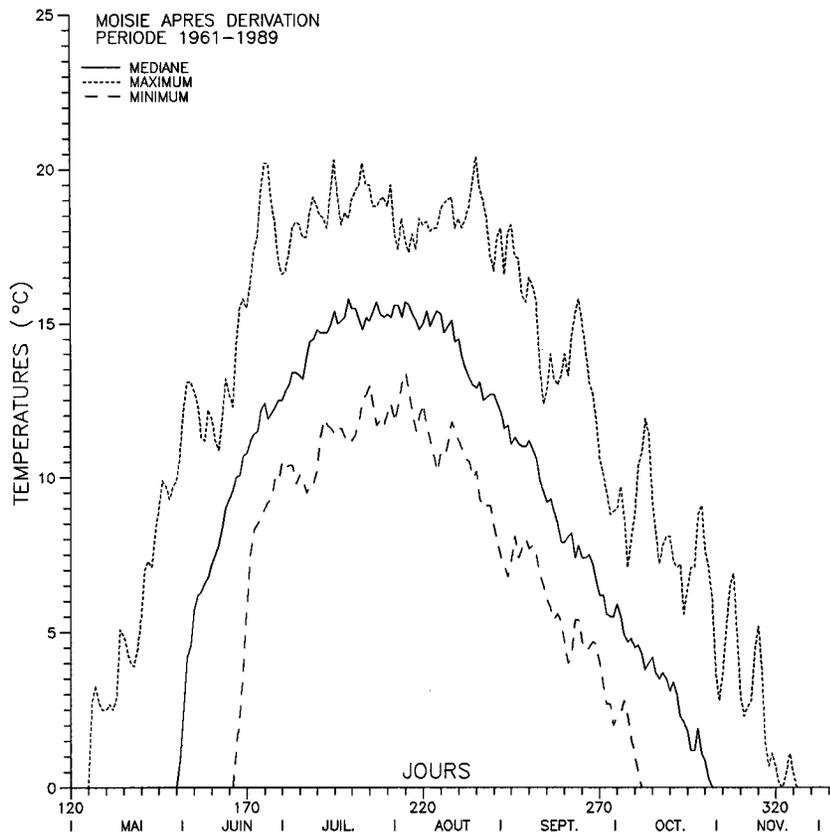


Figure 3.7 Températures journalières maximales, minimales et médianes calculées après dérivation partielle des rivières Aux Pékans et Carheil pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #59 et c.p. #71.

STATION C.P. # 92



STATION C.P. # 96

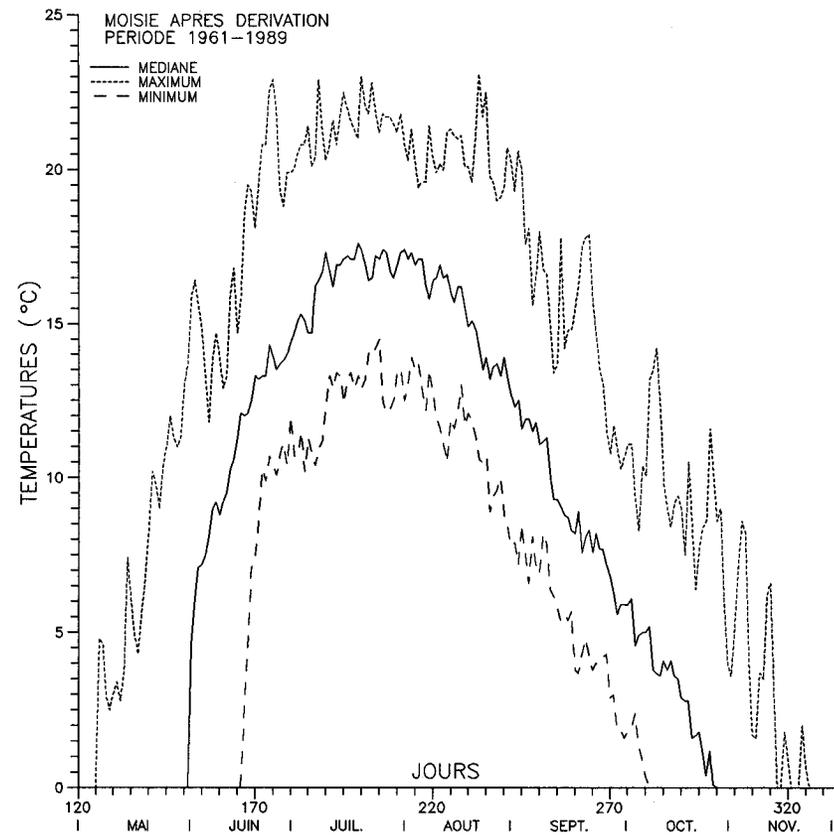
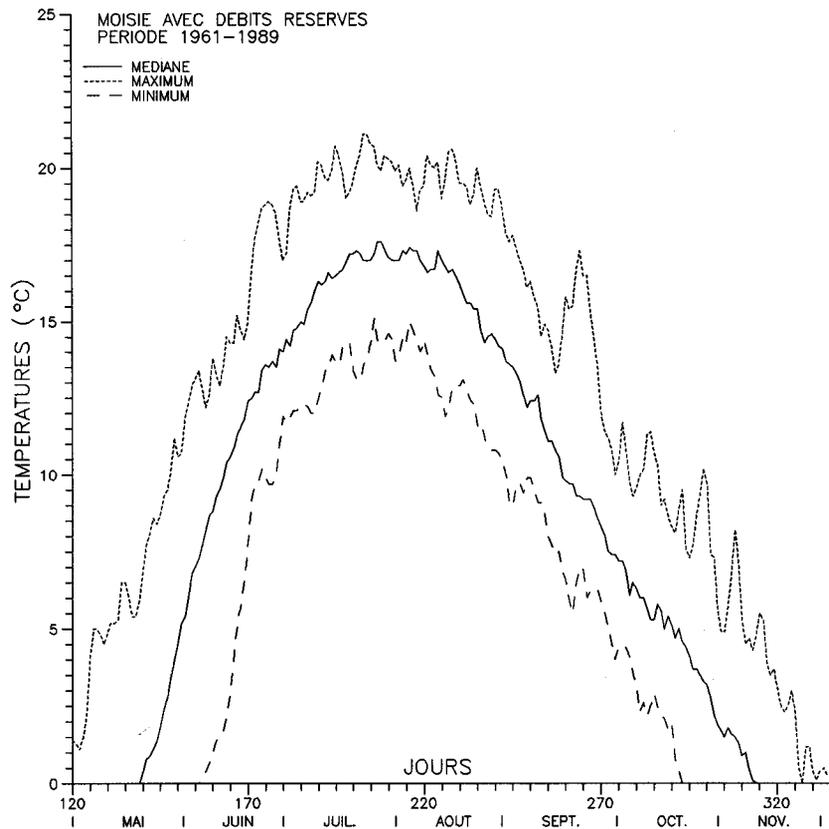


Figure 3.8 Températures journalières maximales, minimales et médianes calculées après dérivation partielle des rivières Aux Pékans et Carheil pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #92 et c.p. #96.

STATION C.P. # 3



STATION C.P. # 4

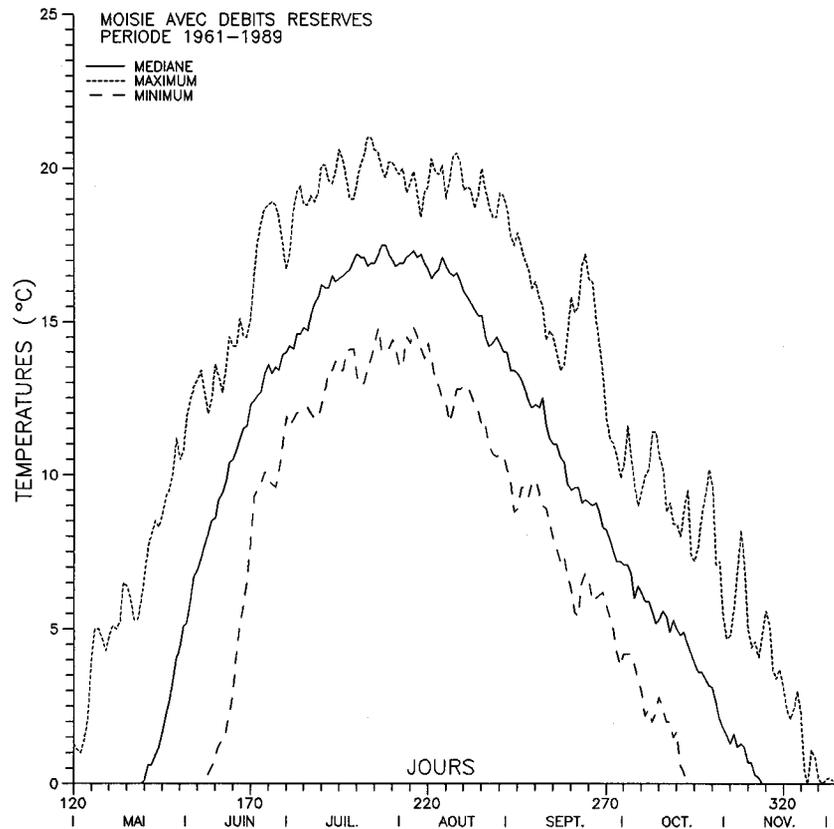
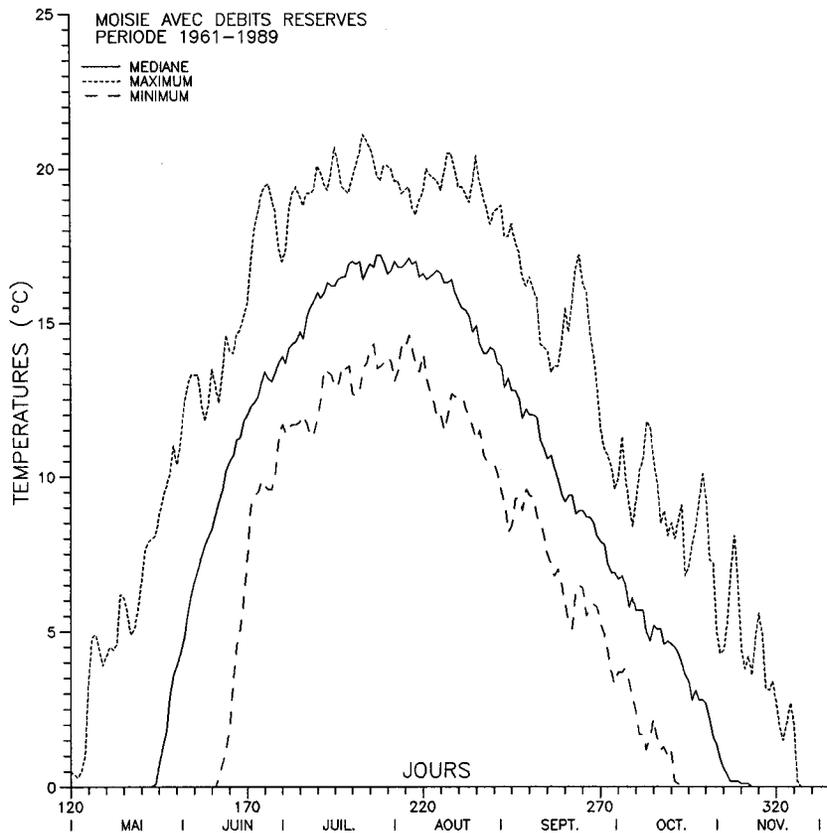


Figure 3.9 Températures journalières maximales, minimales et médianes calculées après dérivation partielle des rivières Aux Pékans et Carheil et débits réservés pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #3 et c.p. #4.

STATION C.P. # 26



STATION C.P. # 46

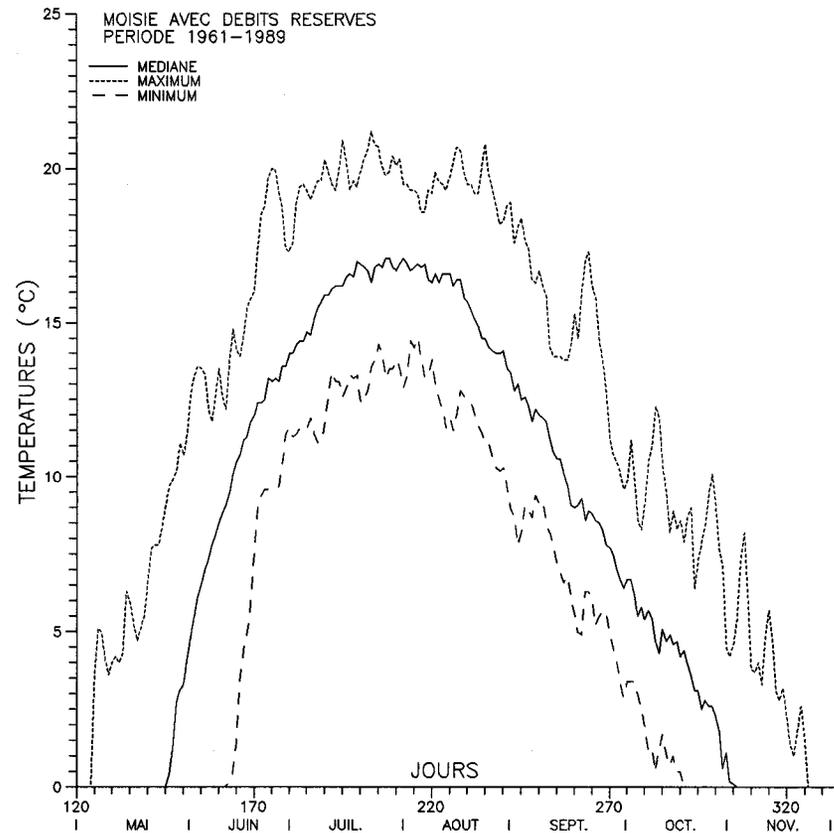
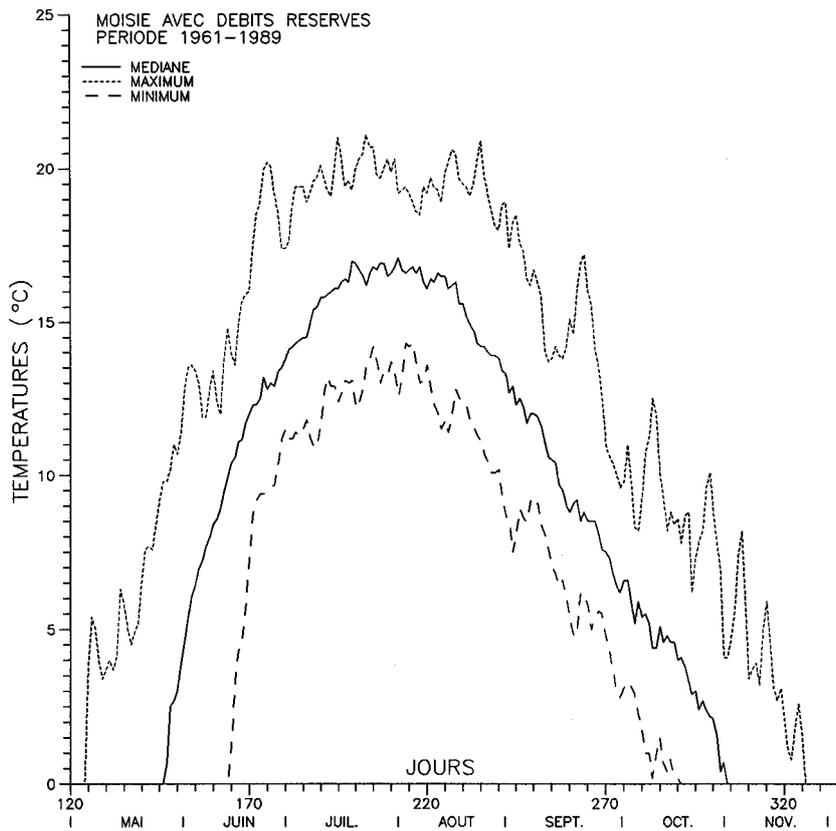


Figure 3.10 Températures journalières maximales, minimales et médianes calculées après dérivation partielle des rivières Aux Pékans et Carheil et débits réservés pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #26 et c.p. #46.

STATION C.P. # 59



STATION C.P. # 71

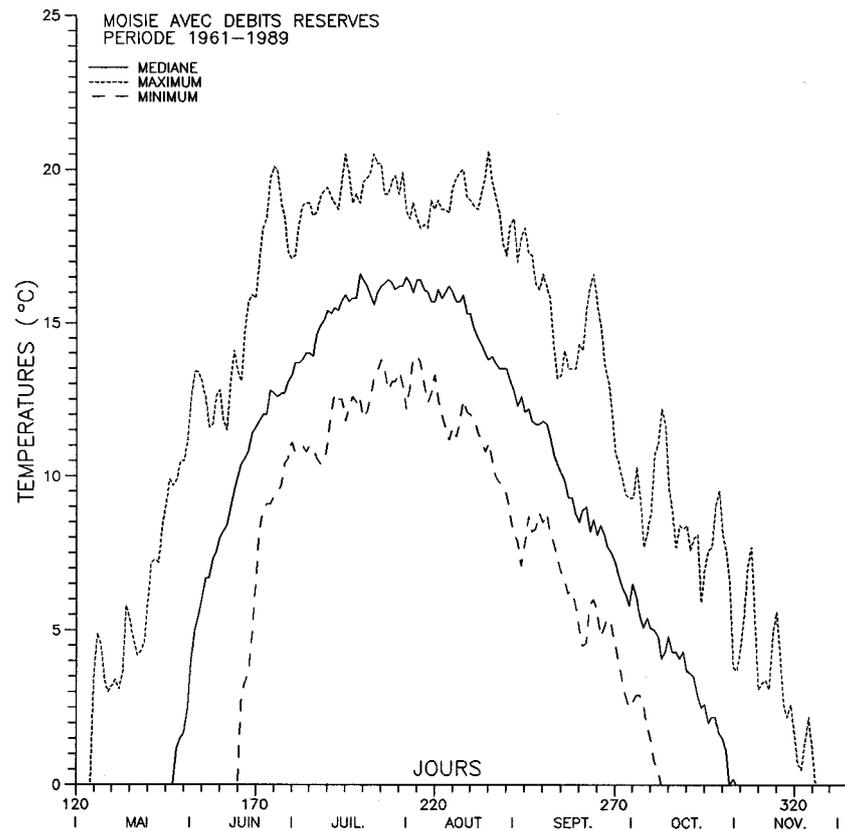
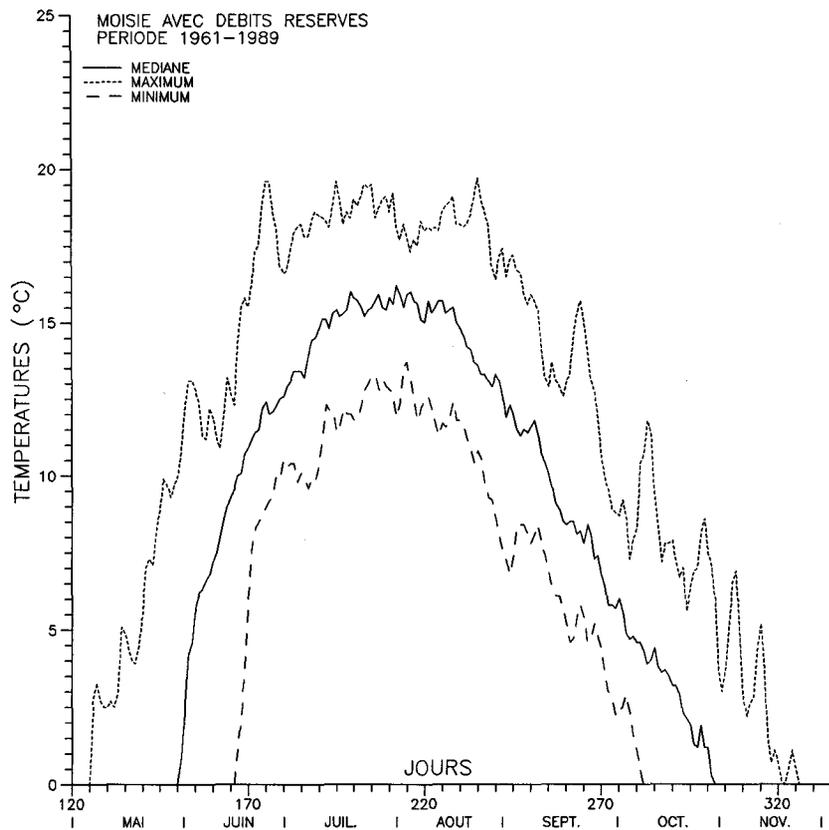


Figure 3.11 Températures journalières maximales, minimales et médianes calculées après dérivation partielle des rivières Aux Pékans et Carheil et débits réservés pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #59 et c.p. #71.

STATION C.P. # 92



STATION C.P. # 96

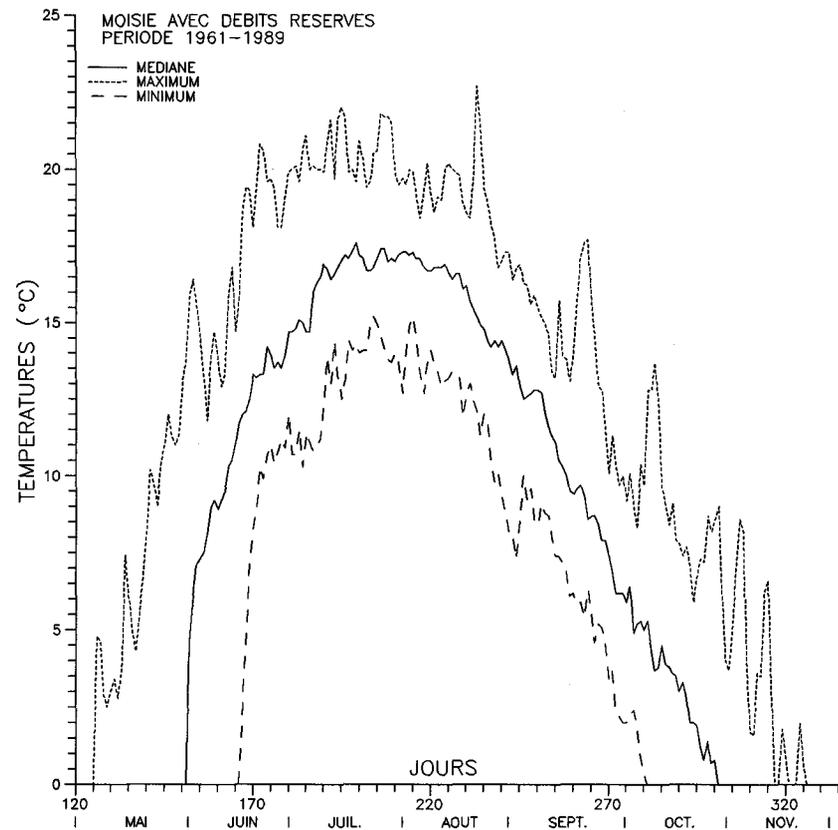


Figure 3.12 Températures journalières maximales, minimales et médianes calculées après dérivation partielle des rivières Aux Pékans et Carheil et débits réservés pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #92 et c.p. #96.

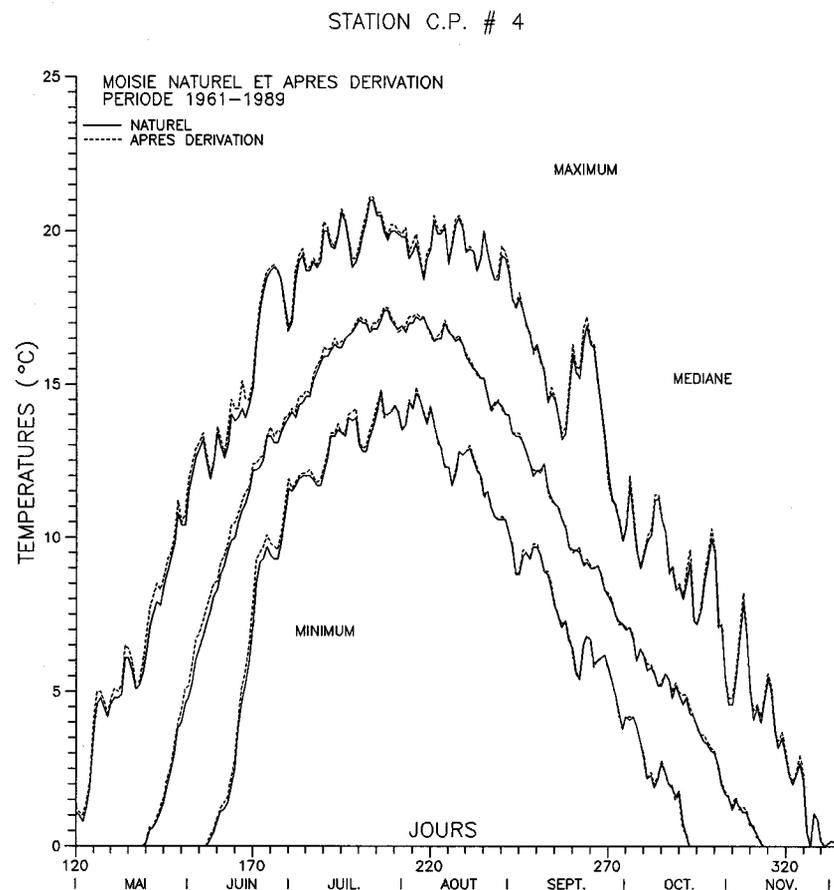
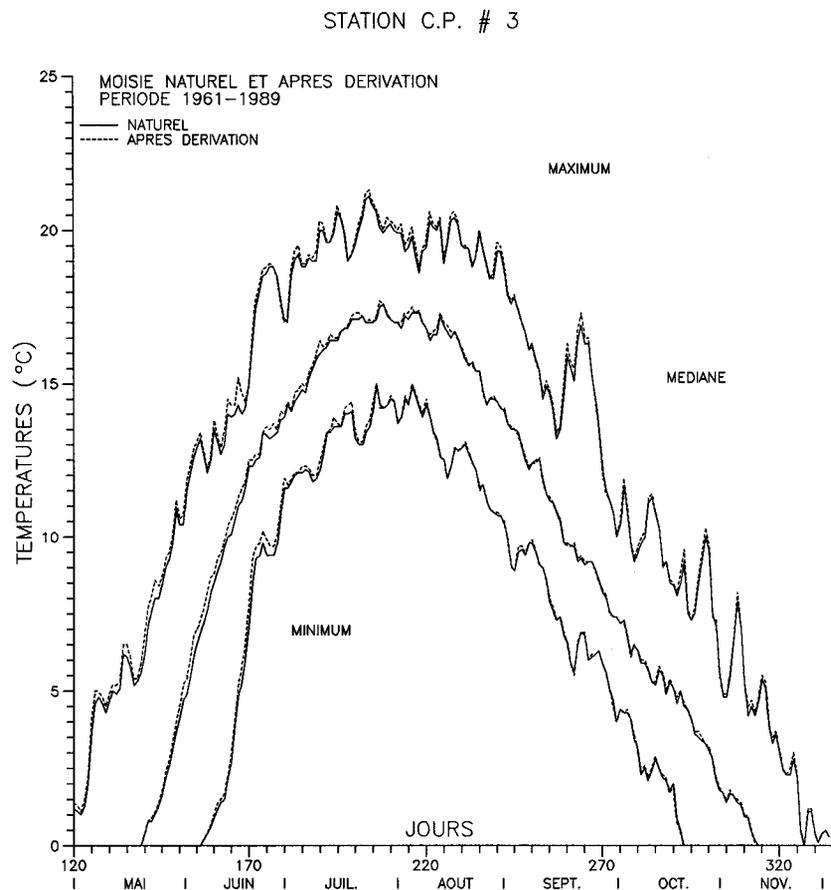
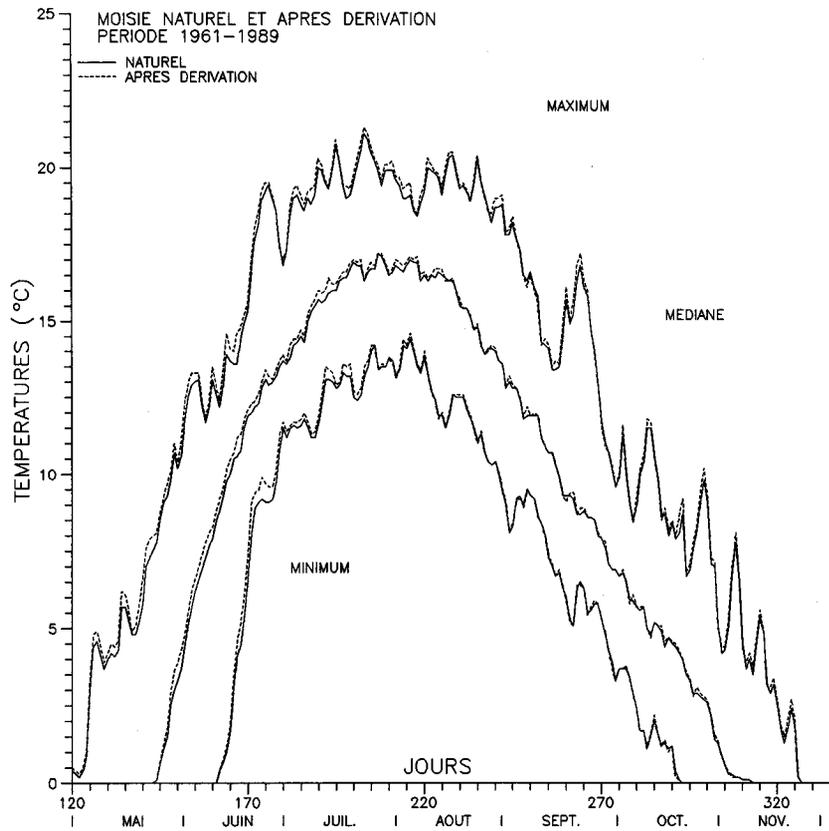


Figure 3.13 Comparaison des températures journalières maximales, minimales et médianes calculées pour le bassin versant naturel et après dérivation partielle des rivières Aux Pékans et Carheil pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #3 et c.p. #4.

STATION C.P. # 26



STATION C.P. # 46

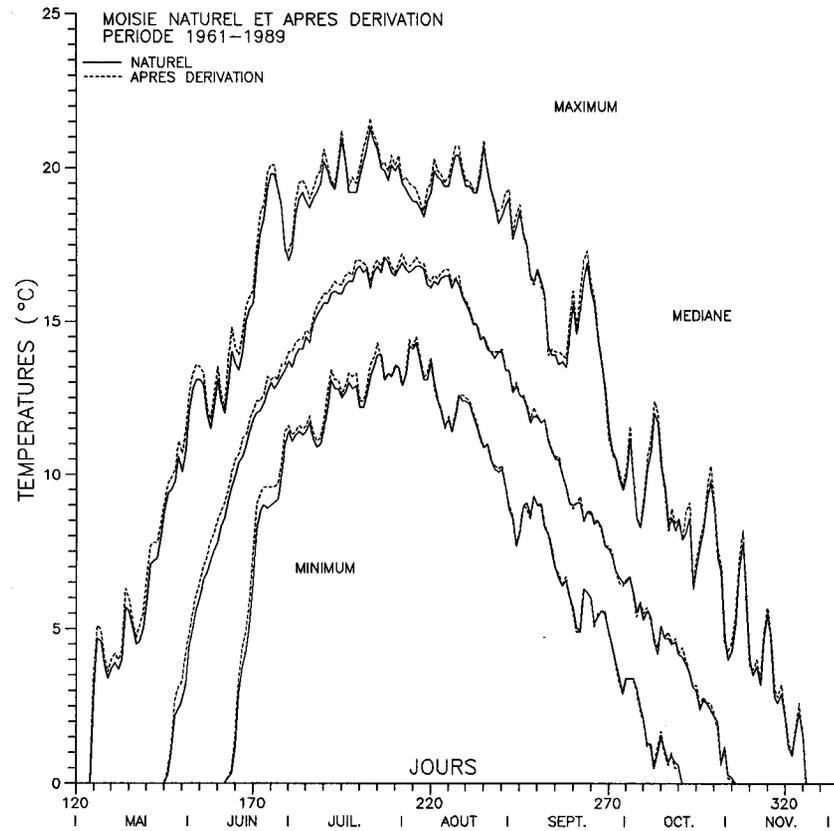
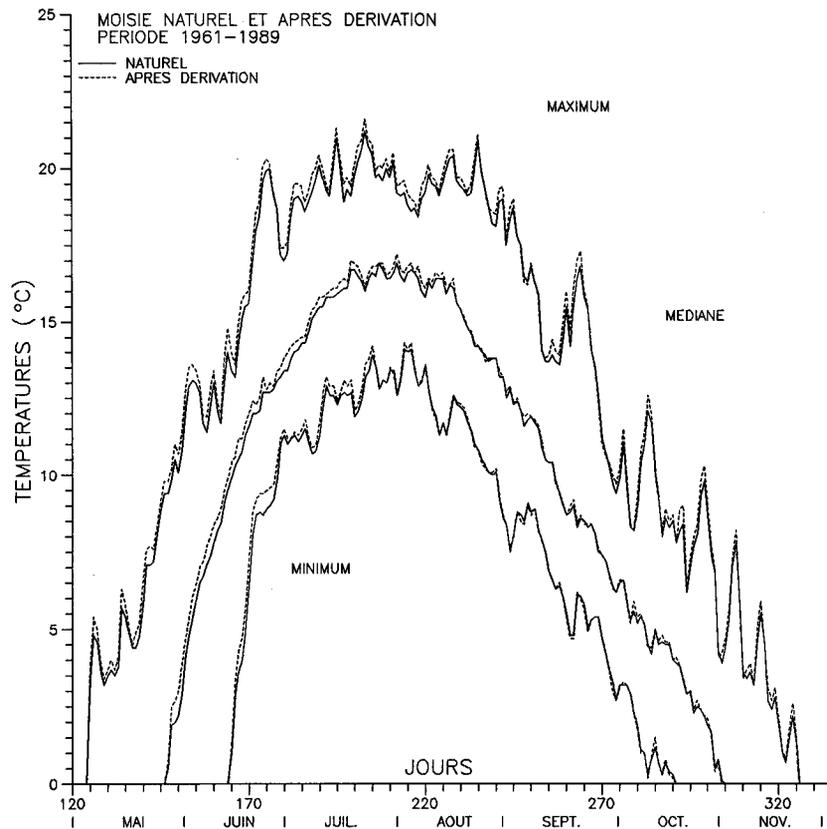


Figure 3.14 Comparaison des températures journalières maximales, minimales et médianes calculées pour le bassin versant naturel et après dérivation partielle des rivières Aux Pékans et Carheil pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #26 et c.p. #46.

STATION C.P. # 59



STATION C.P. # 71

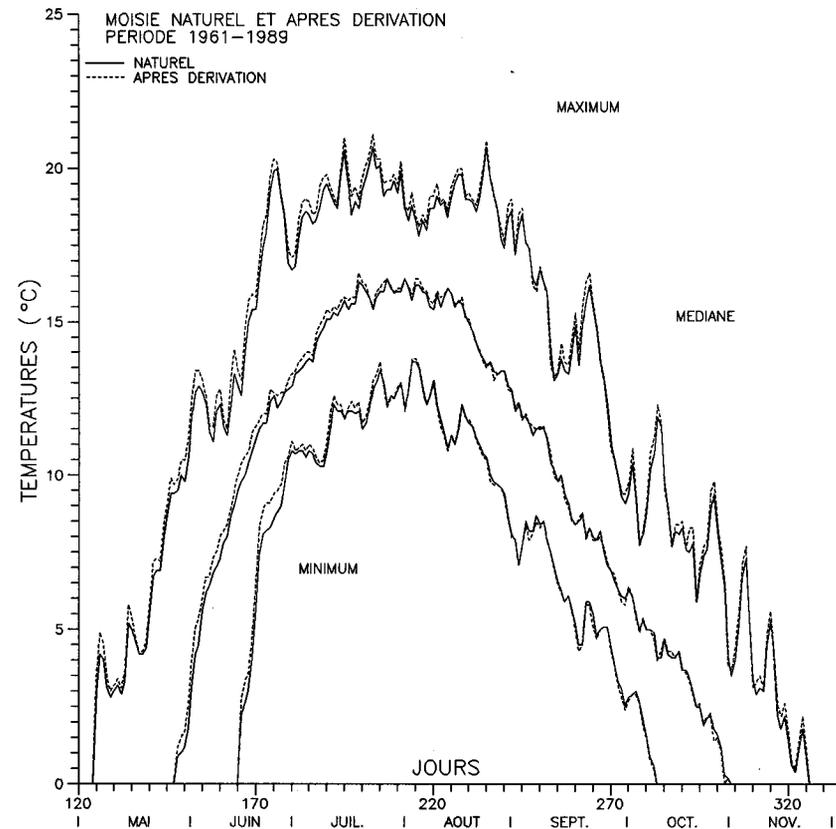
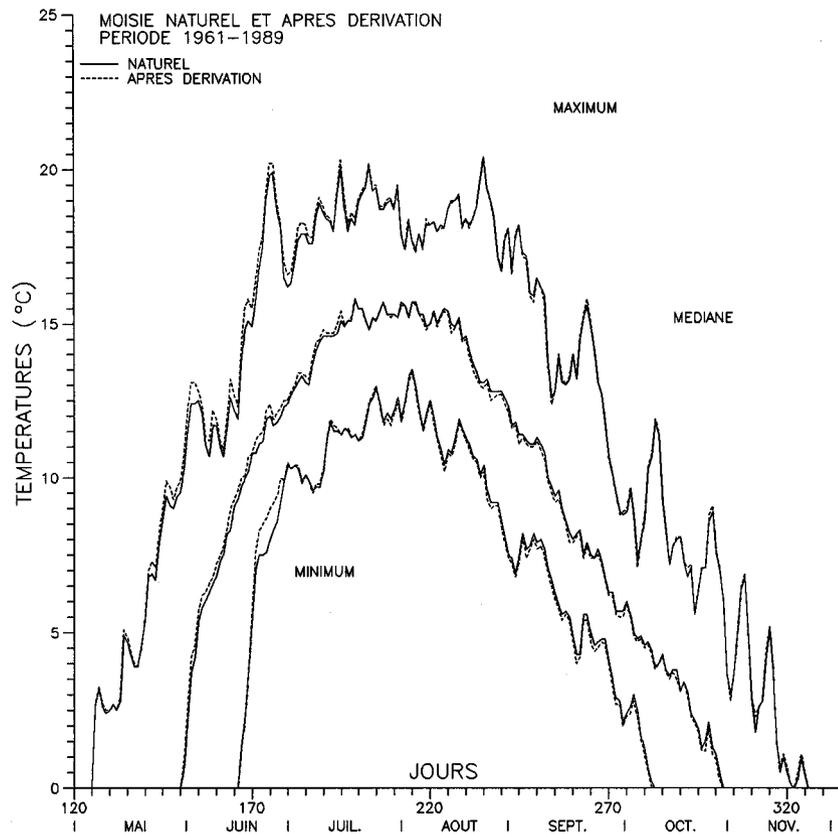


Figure 3.15 Comparaison des températures journalières maximales, minimales et médianes calculées pour le bassin versant naturel et après dérivation partielle des rivières Aux Pékans et Carheil pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #59 et c.p. #71.

STATION C.P. # 92



STATION C.P. # 96

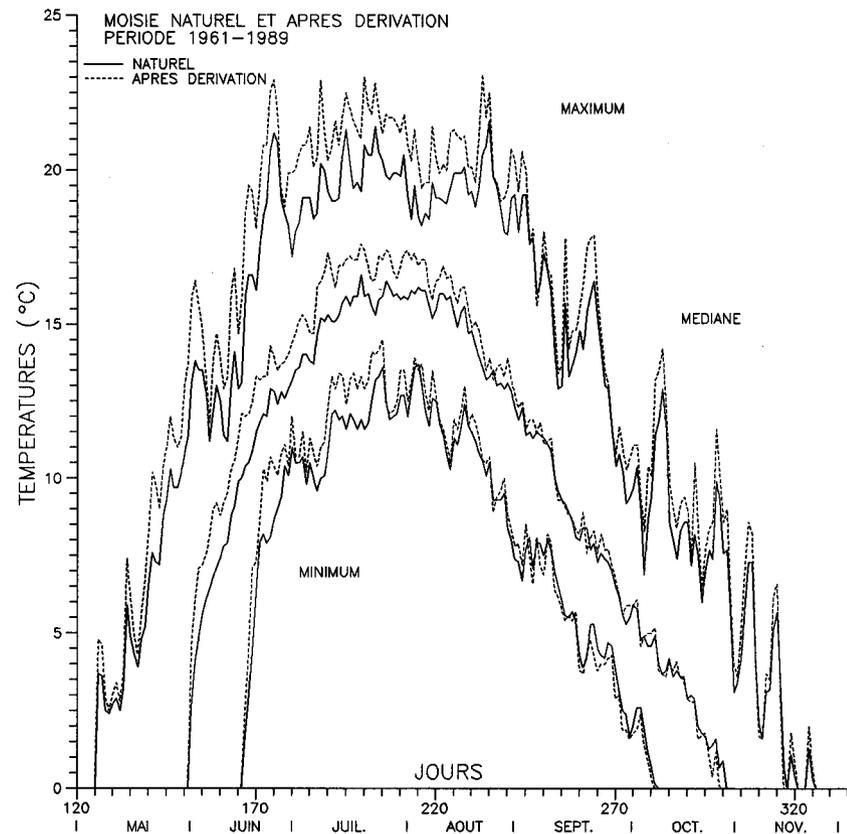
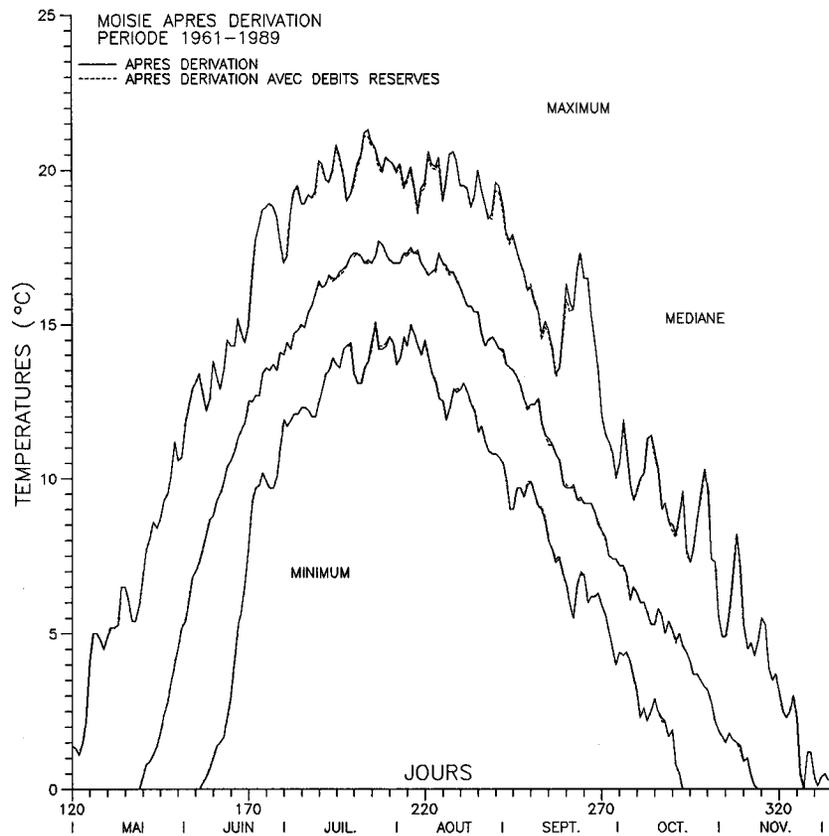


Figure 3.16 Comparaison des températures journalières maximales, minimales et médianes calculées pour le bassin versant naturel et après dérivation partielle des rivières Aux Pékans et Carheil pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #92 et c.p. #96.

STATION C.P. # 3



STATION C.P. # 4

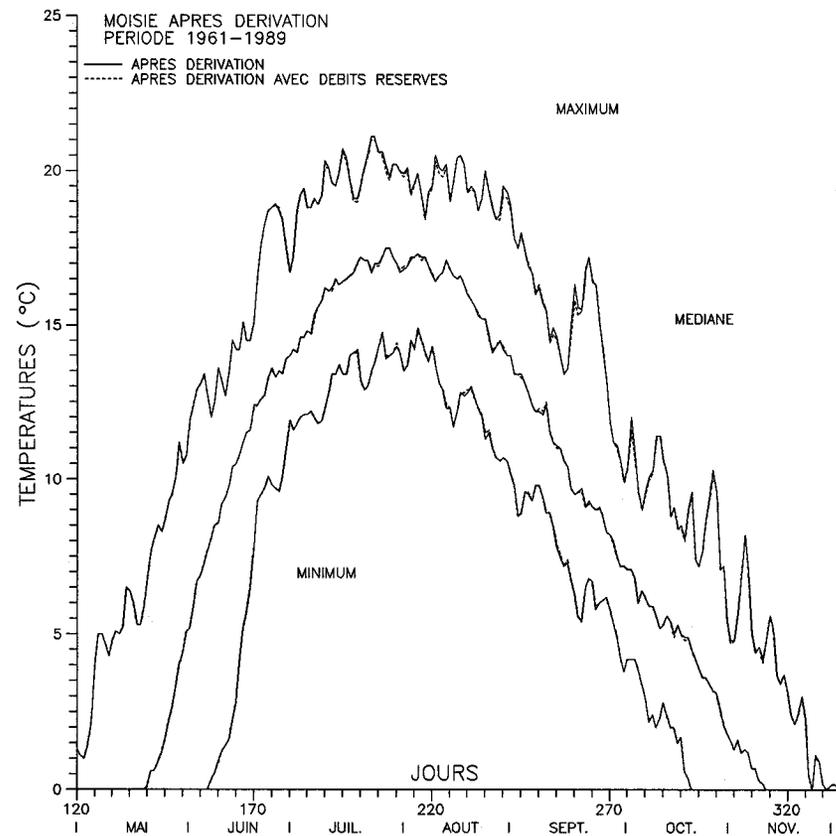
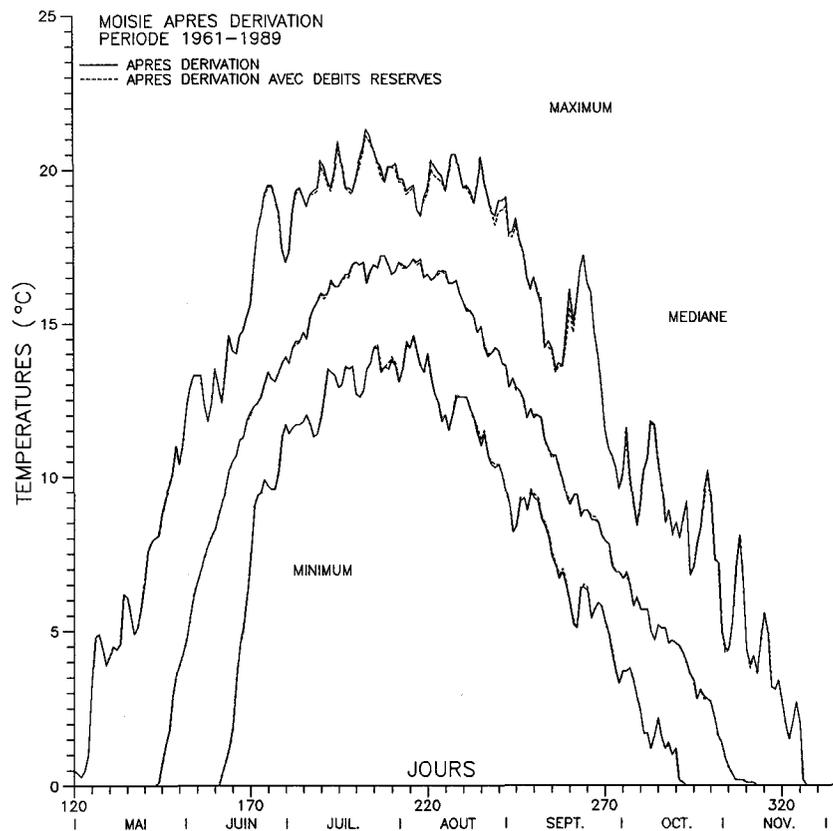


Figure 3.17 Comparaison des températures journalières maximales, minimales et médianes calculées pour le bassin versant de la rivière Moisie après dérivation partielle des rivières Aux Pékans et Carheil, avec et sans débit réservé, pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #3 et c.p. #4.

STATION C.P. # 26



STATION C.P. # 46

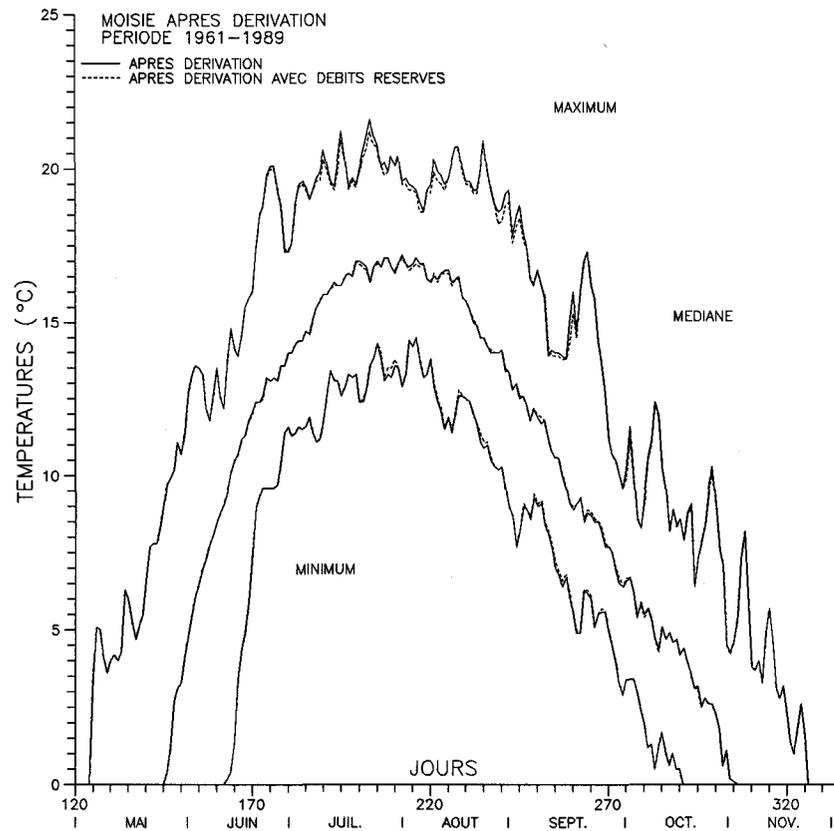
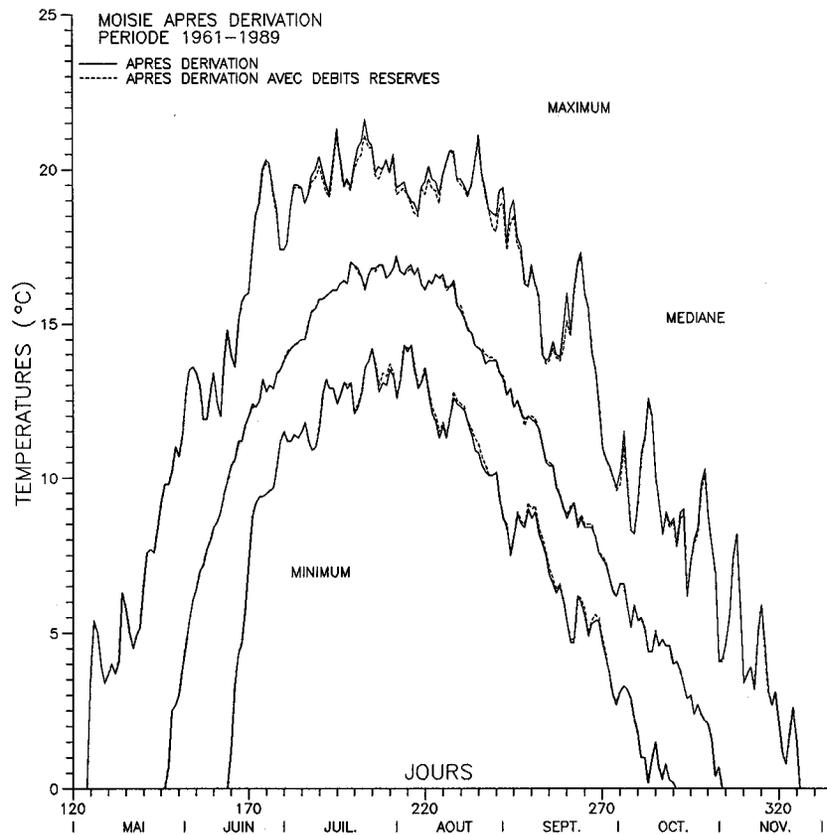


Figure 3.18 Comparaison des températures journalières maximales, minimales et médianes calculées pour le bassin versant de la rivière Moisie après dérivation partielle des rivières Aux Pékans et Carheil, avec et sans débit réservé, pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #26 et c.p. #46.

STATION C.P. # 59



STATION C.P. # 71

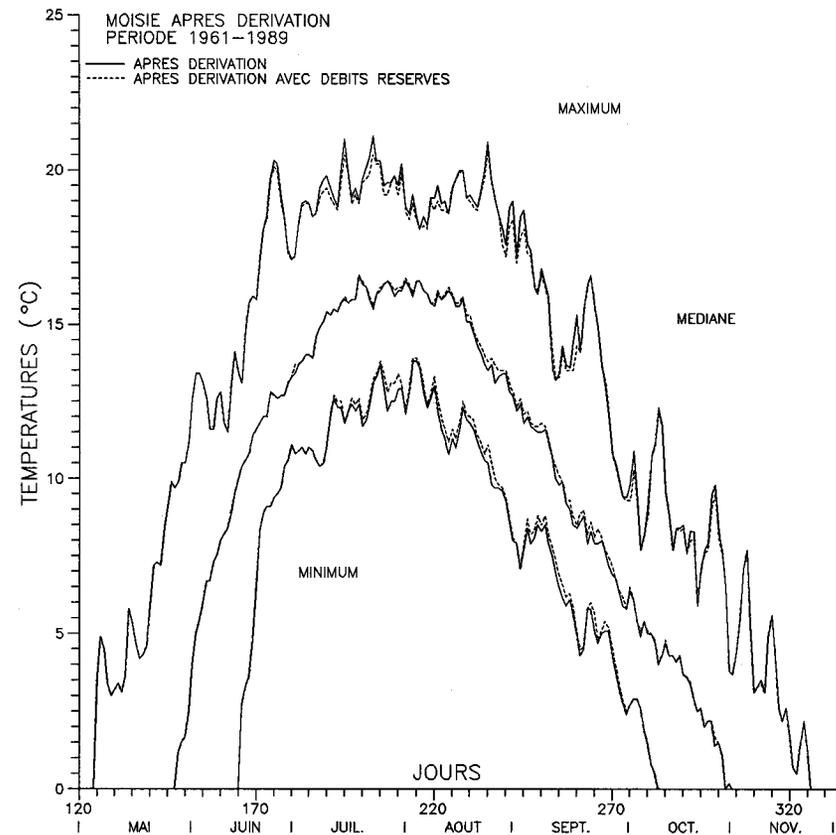
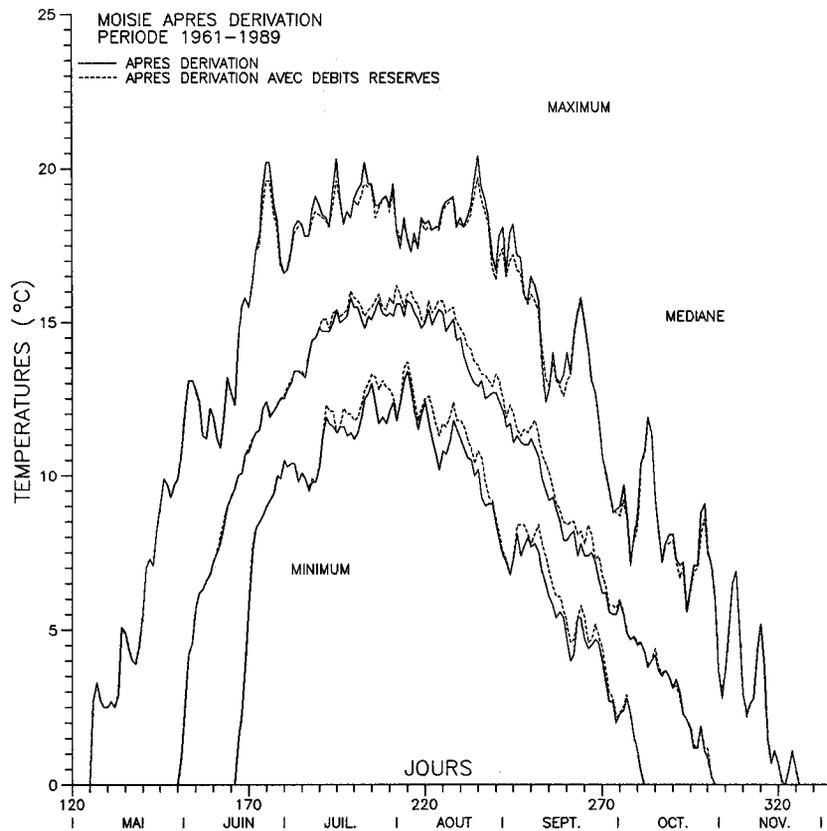


Figure 3.19 Comparaison des températures journalières maximales, minimales et médianes calculées pour le bassin versant de la rivière Moisie après dérivation partielle des rivières Aux Pékans et Carheil, avec et sans débit réservé, pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #59 et c.p. #71.

STATION C.P. # 92



STATION C.P. # 96

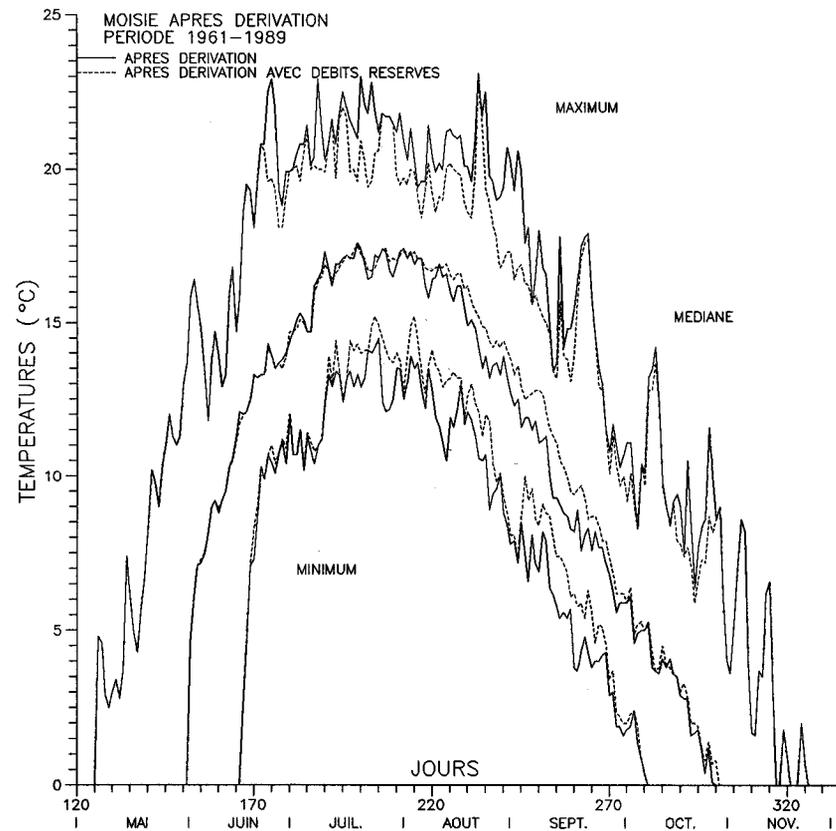
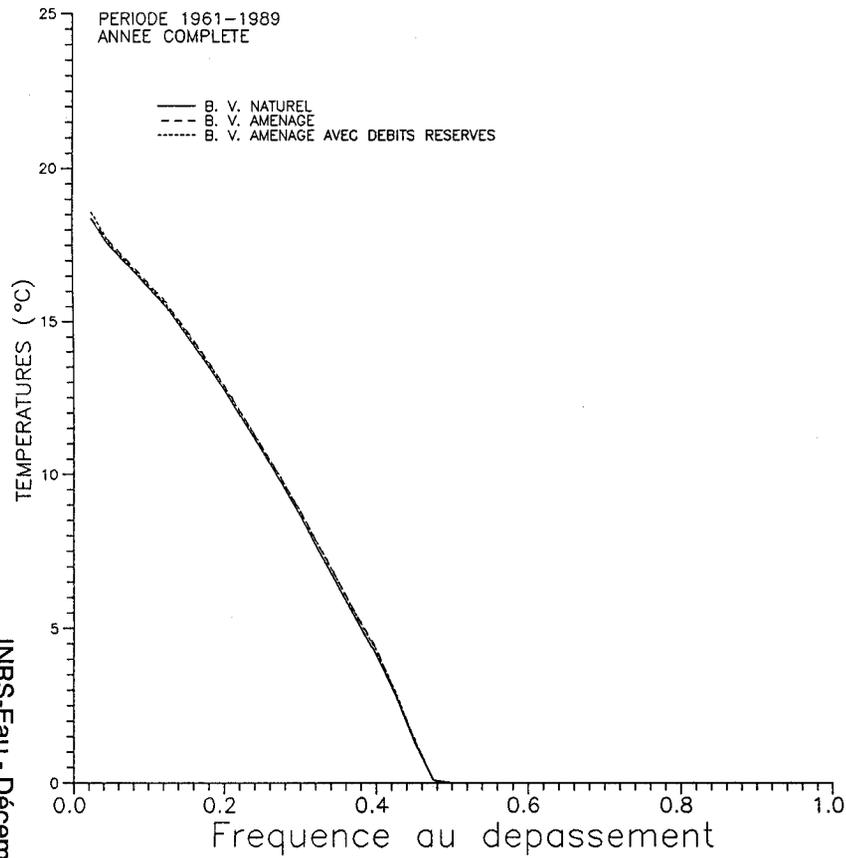


Figure 3.20 Comparaison des températures journalières maximales, minimales et médianes calculées pour le bassin versant de la rivière Moisie après dérivation partielle des rivières Aux Pékans et Carheil, avec et sans débit réservé, pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #92 et c.p. #96.

STATION C.P. # 3



STATION C.P. # 4

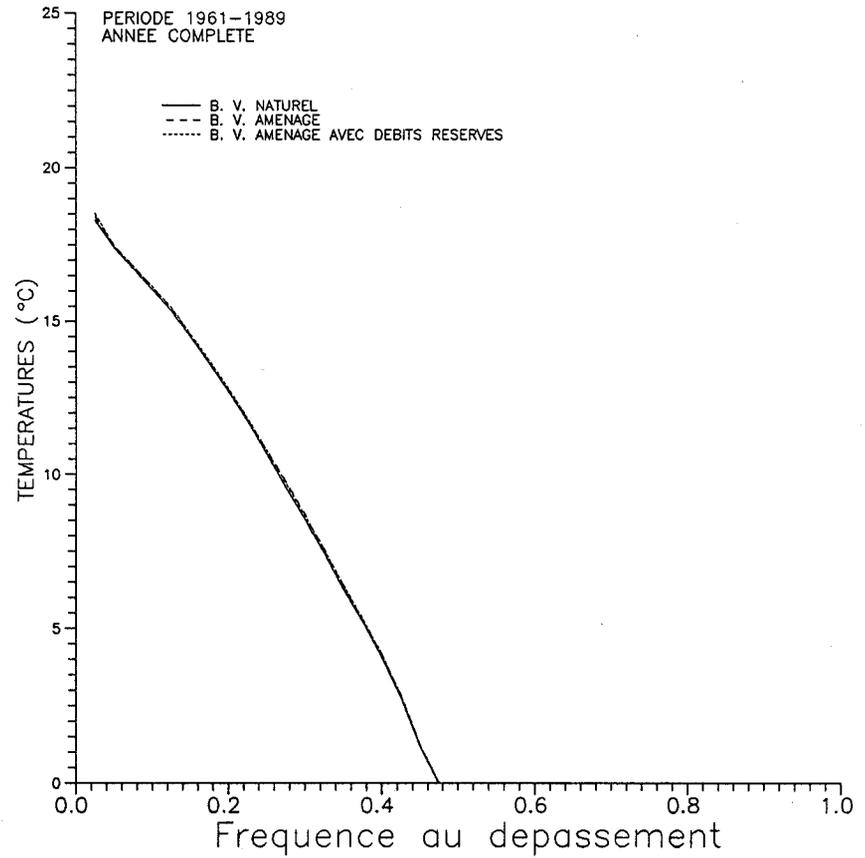


Figure 3.21 Courbes des températures journalières classées pour le bassin versant naturel et aménagé pour tous les jours de l'année de la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #3 et c.p. #4.

STATION C.P. # 26

STATION C.P. # 46

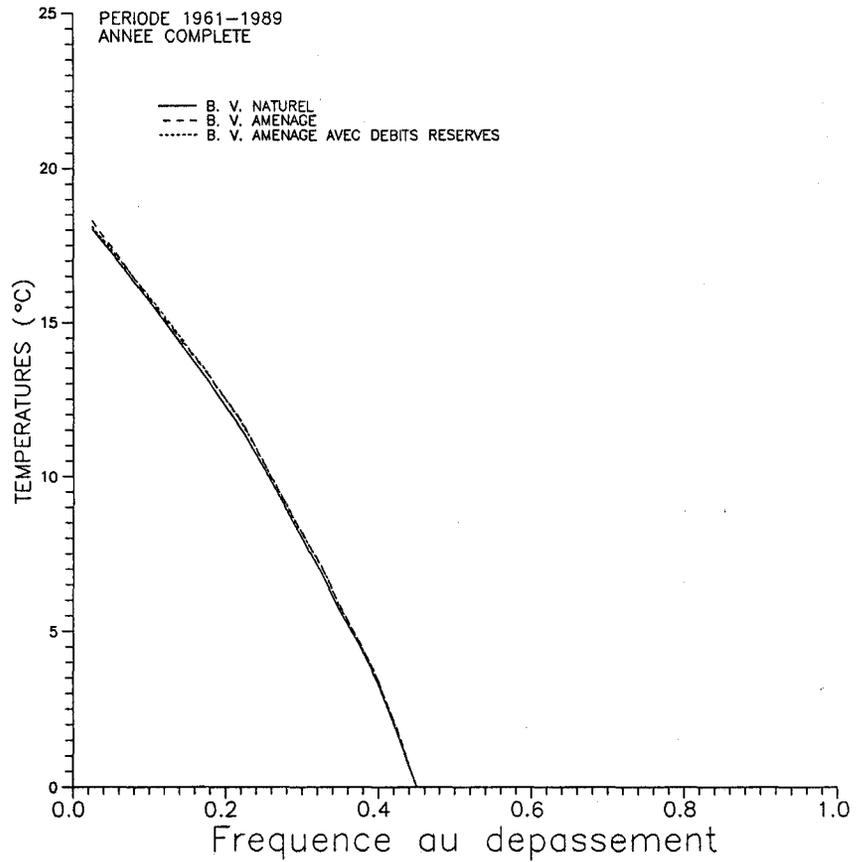
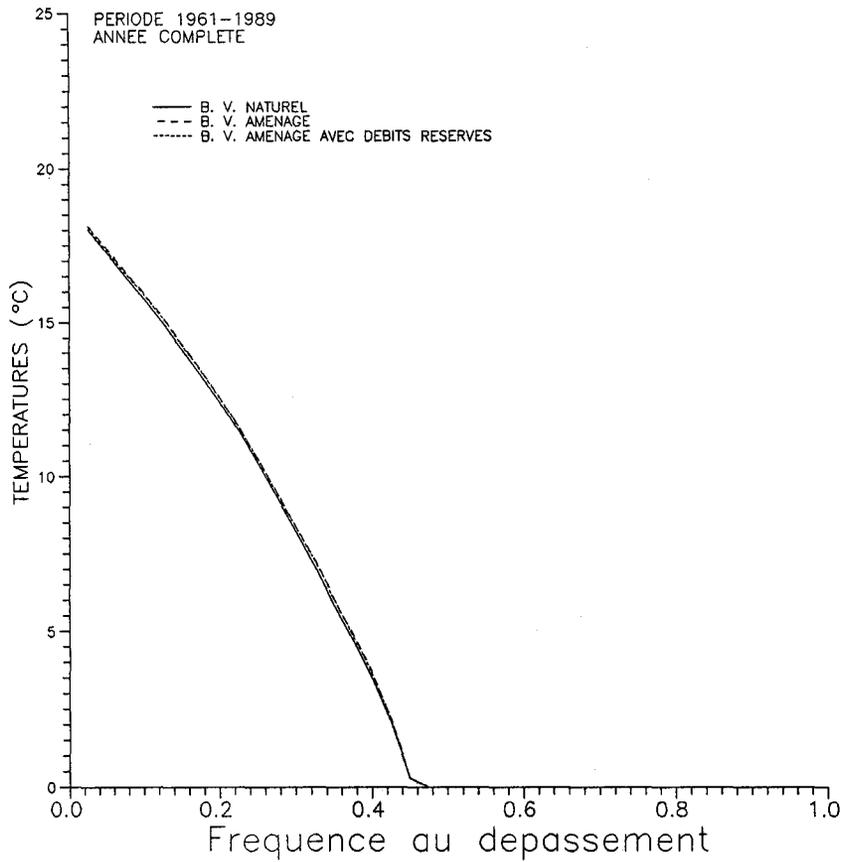


Figure 3.22 Courbes des températures journalières classées pour le bassin versant naturel et aménagé pour tous les jours de l'année de la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #26 et c.p. #46.

STATION C.P. # 59

STATION C.P. # 71

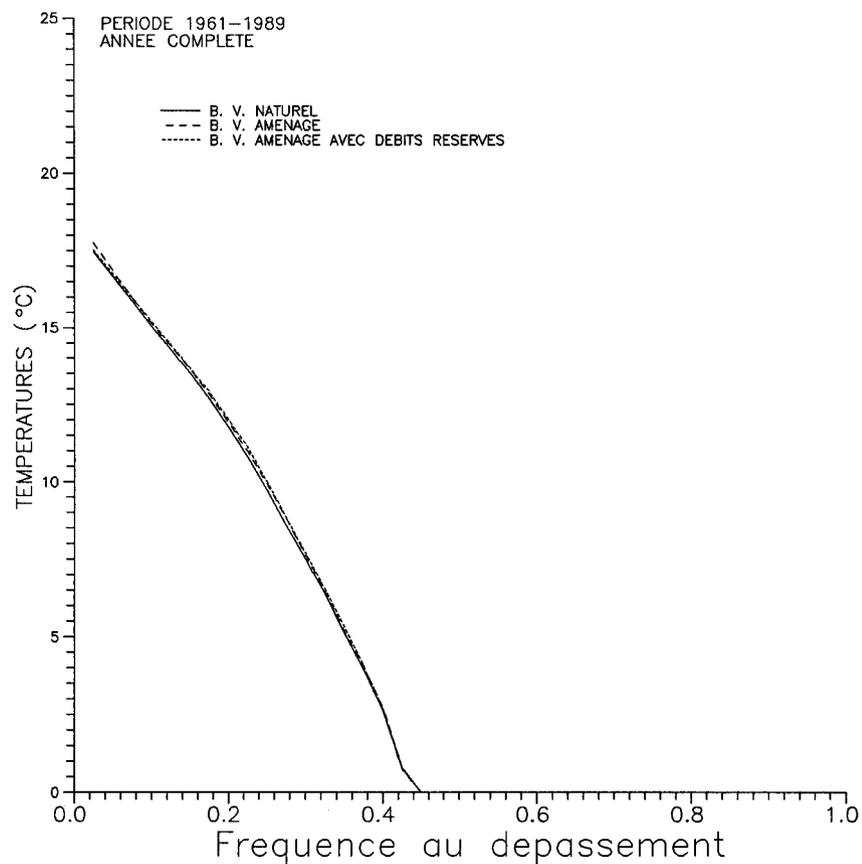
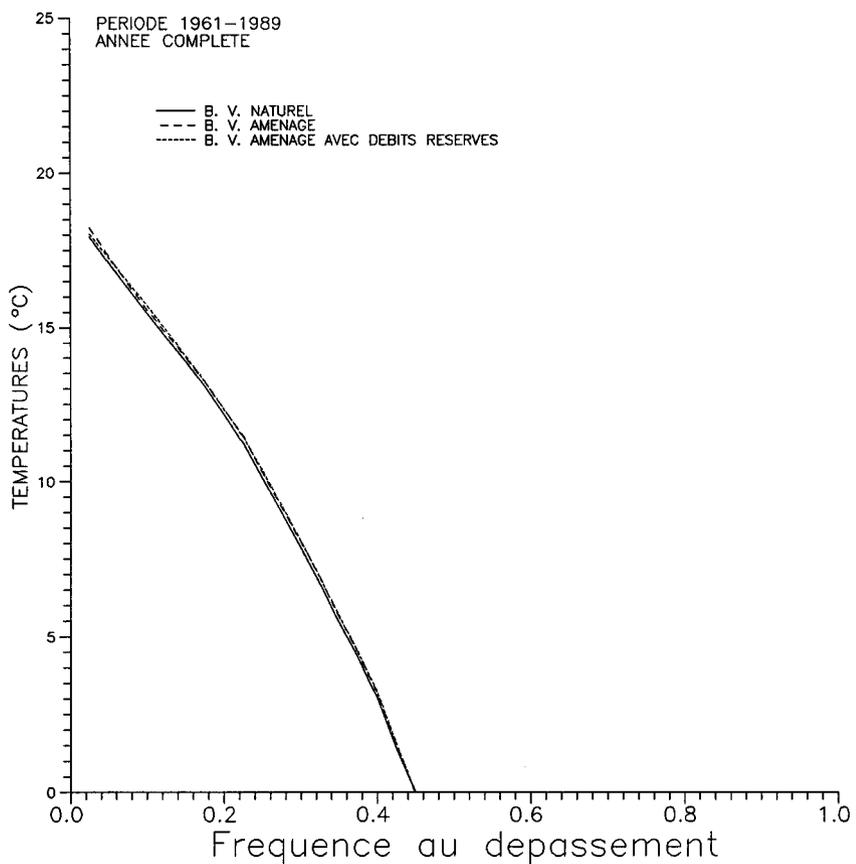


Figure 3.23 Courbes des températures journalières classées pour le bassin versant naturel et aménagé pour tous les jours de l'année de la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #59 et c.p. #71.

STATION C.P. # 92

STATION C.P. # 96

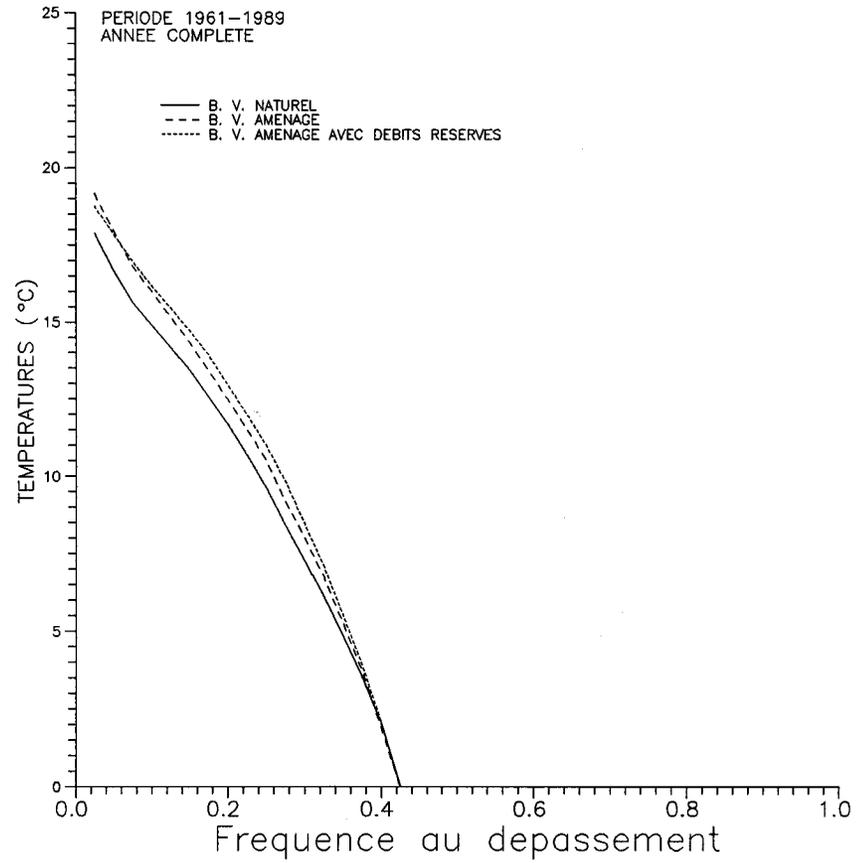
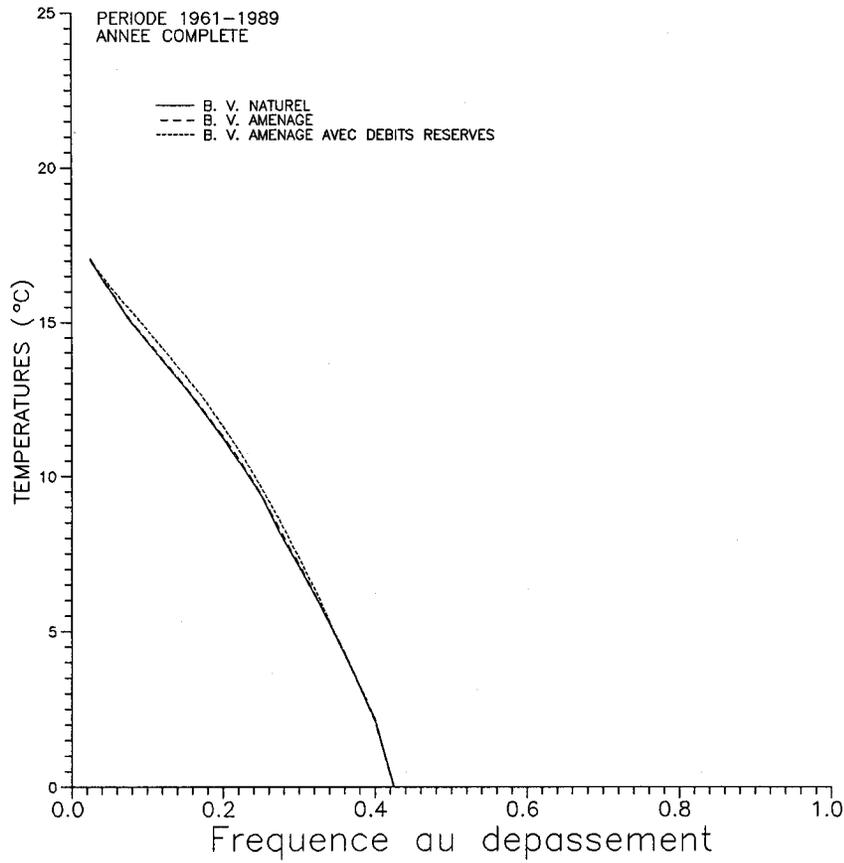
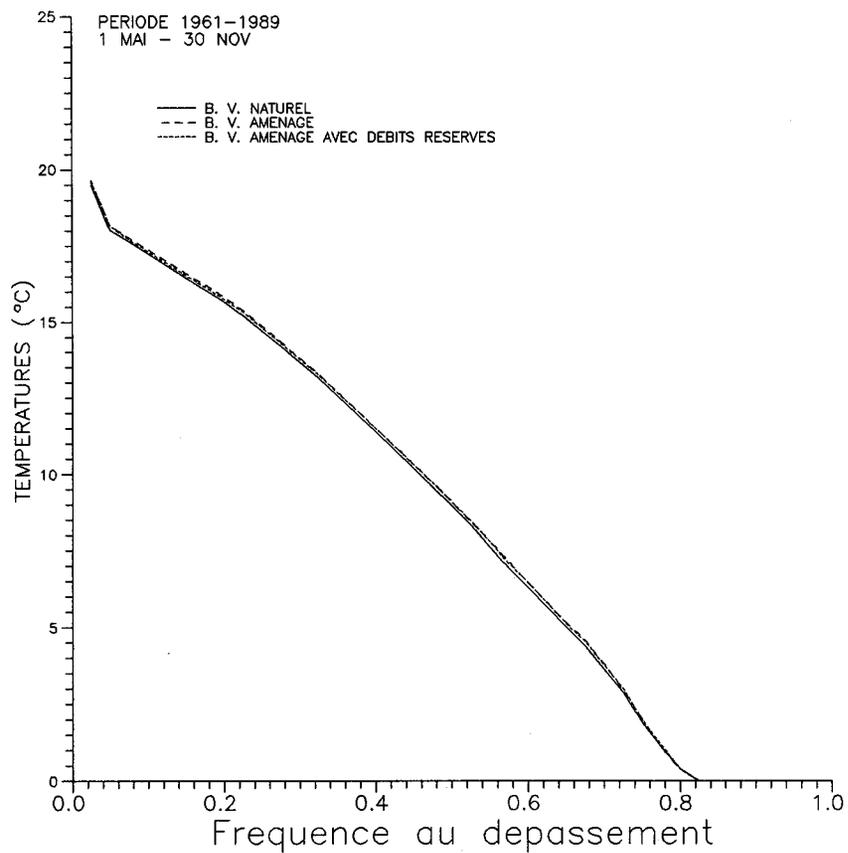


Figure 3.24 Courbes des températures journalières classées pour le bassin versant naturel et aménagé pour tous les jours de l'année de la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #92 et c.p. #96.

STATION C.P. # 3



STATION C.P. # 4

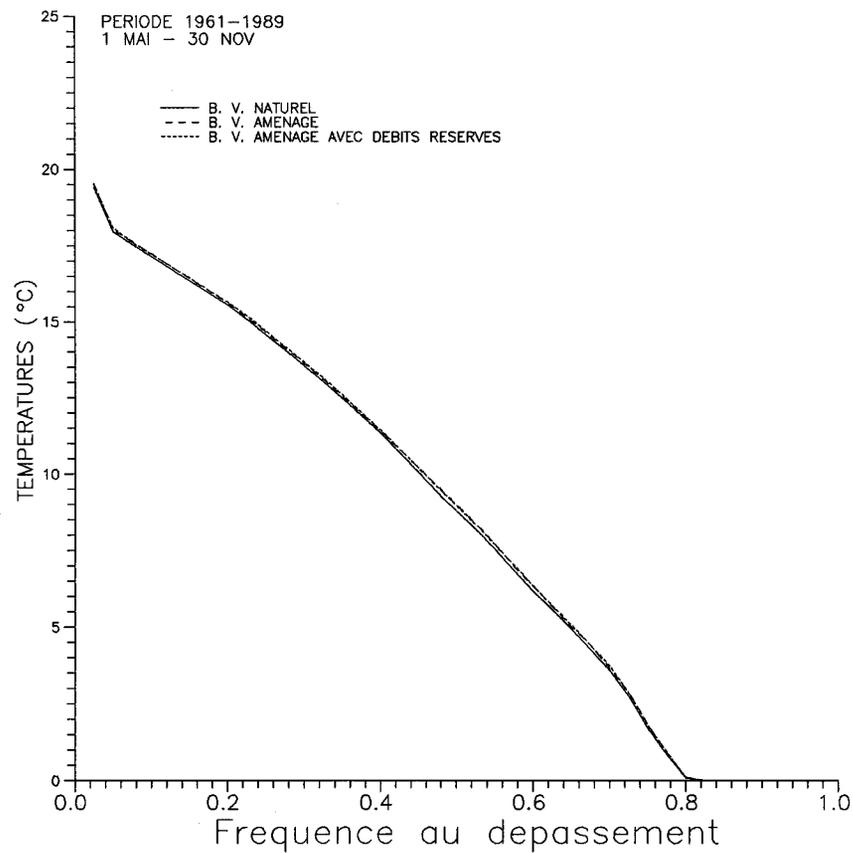
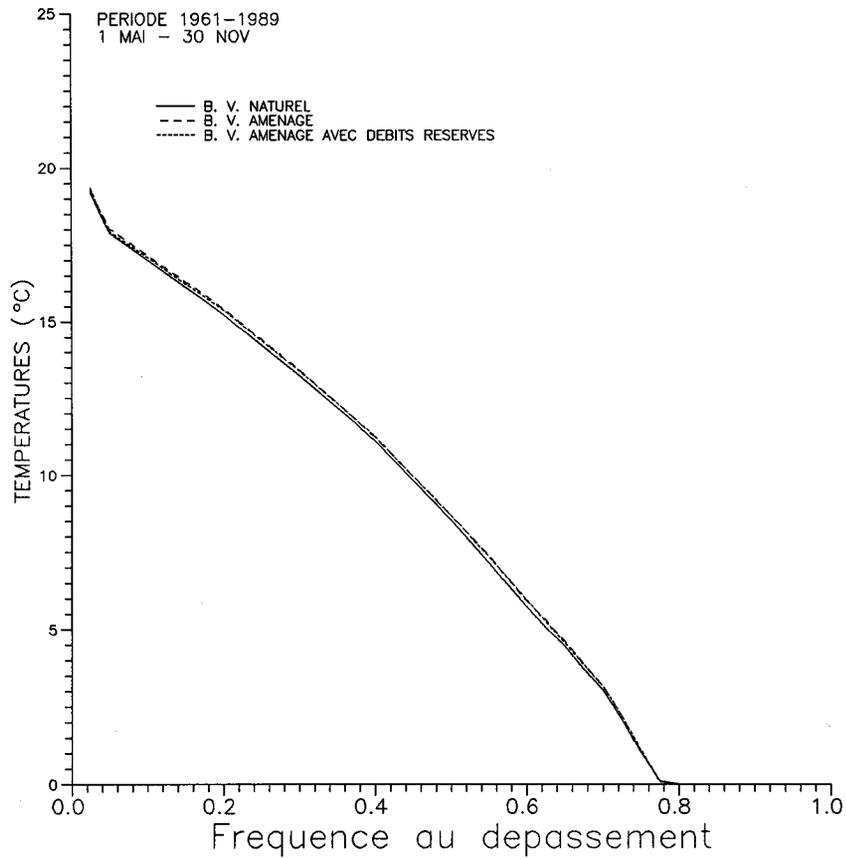


Figure 3.25 Courbes des températures journalières classées pour le bassin versant naturel et aménagé du 1^{er} mai au 30 novembre pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #3 et c.p. #4.

STATION C.P. # 26



STATION C.P. # 46

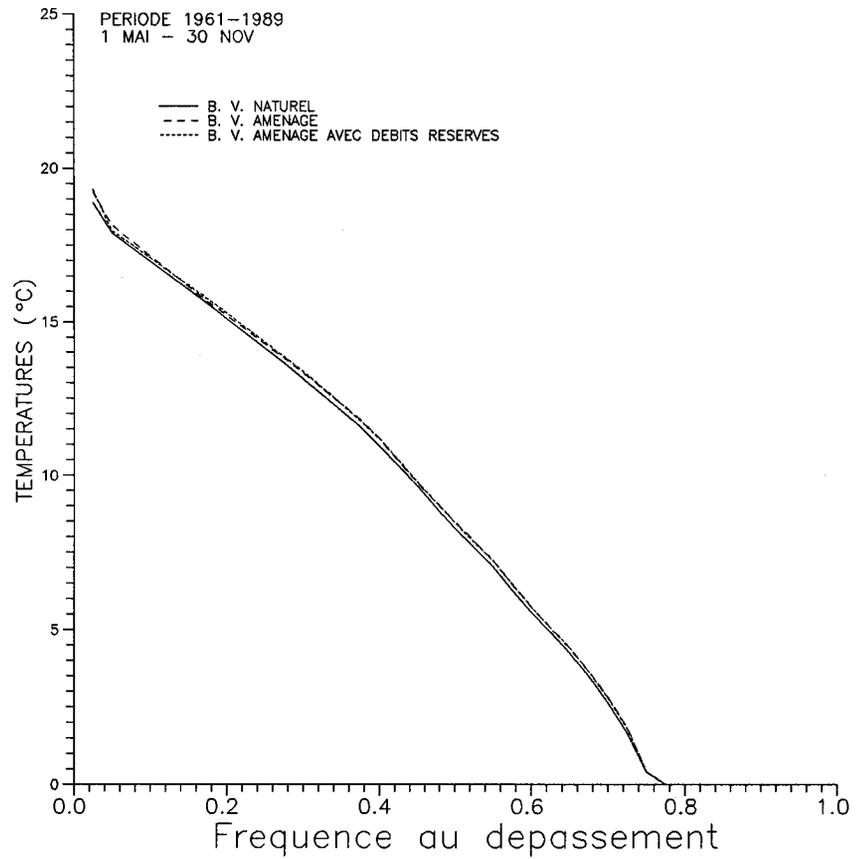


Figure 3.26 Courbes des températures journalières classées pour le bassin versant naturel et aménagé du 1^{er} mai au 30 novembre pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #26 et c.p. #46.

STATION C.P. # 59

STATION C.P. # 71

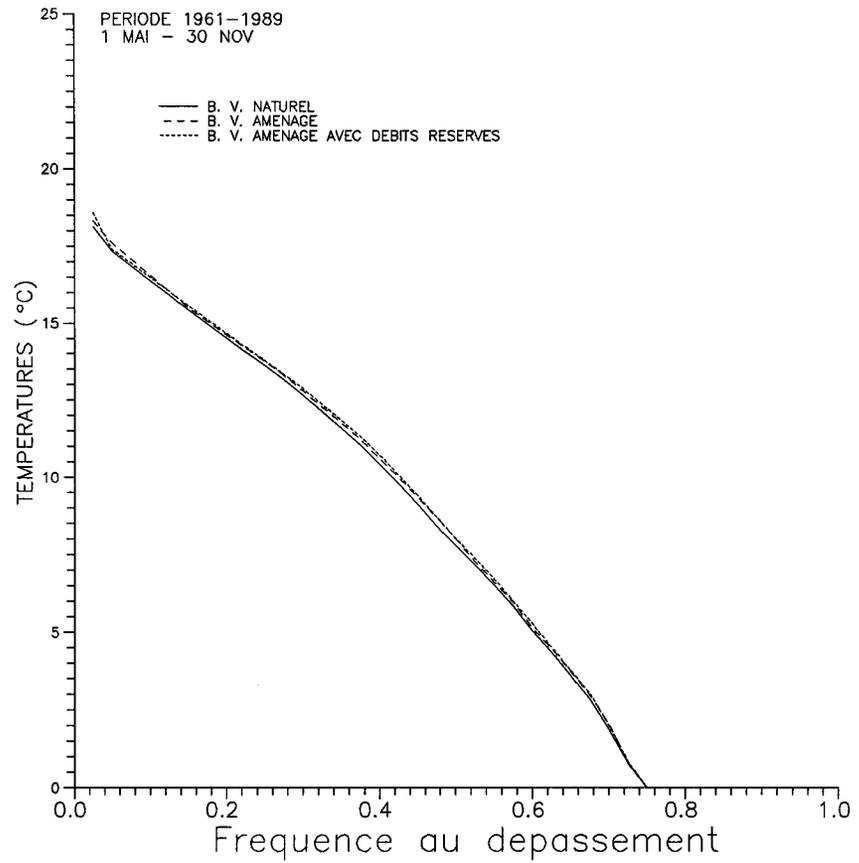
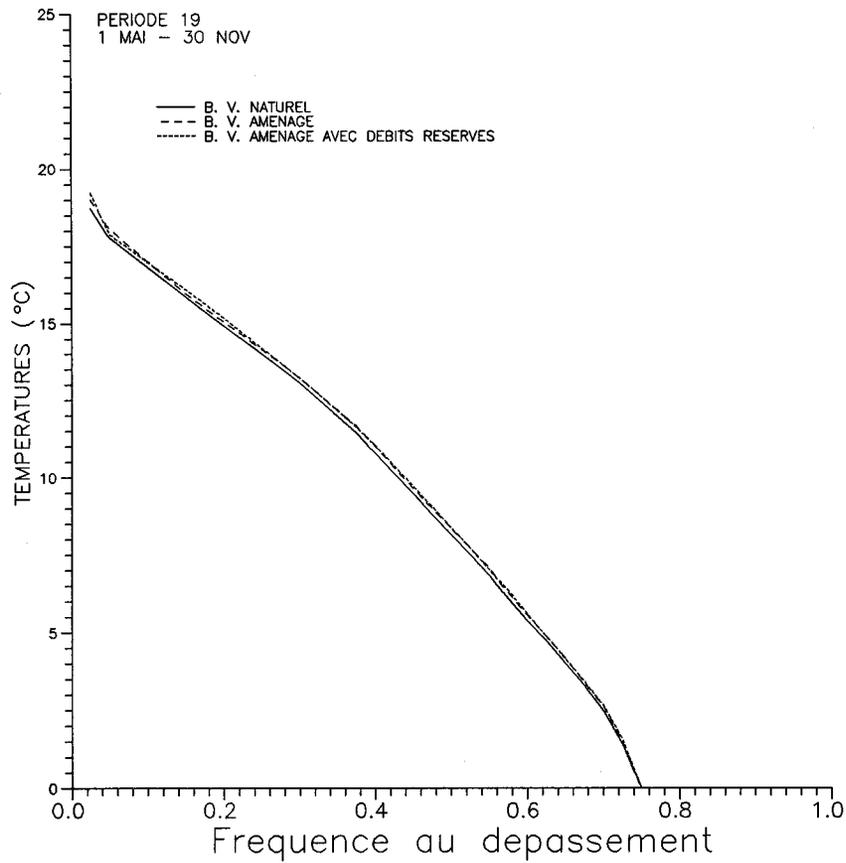


Figure 3.27 Courbes des températures journalières classées pour le bassin versant naturel et aménagé du 1^{er} mai au 30 novembre pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #59 et c.p. #71.

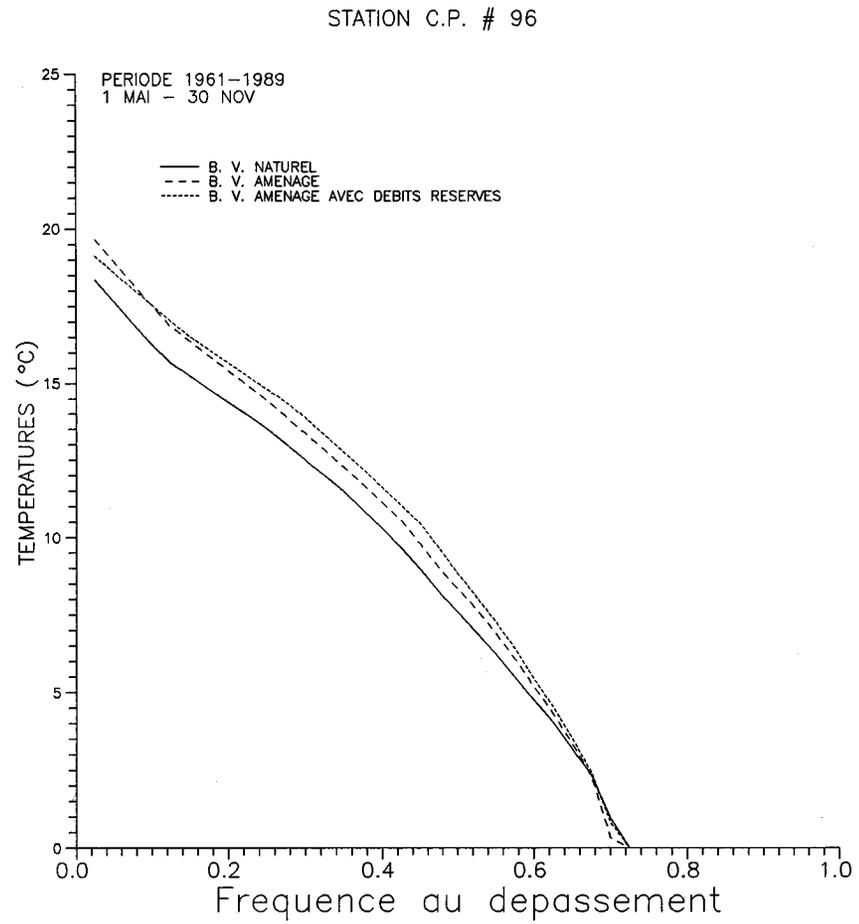
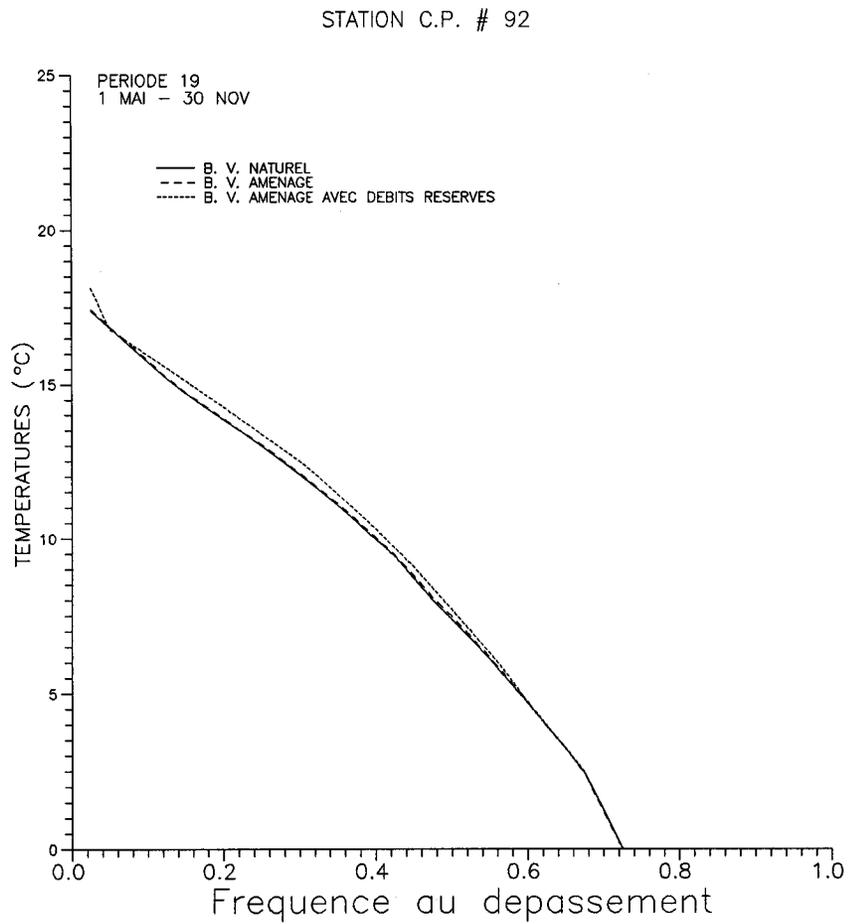


Figure 3.28 Courbes des températures journalières classées pour le bassin versant naturel et aménagé du 1^{er} mai au 30 novembre pour la période 1961 à 1989 aux stations c.p. #92 et c.p. #96.

CONCLUSION

CONCLUSION

L'analyse des débits observés et simulés à la station 072301 de la rivière Moisie et à la station 072302 de la rivière aux Pékans nous permet d'affirmer que les stations météorologiques utilisées, Wabush et Sept-Iles, sont bien représentatives des conditions météorologiques sur le bassin versant de la rivière Moisie et sur le bassin de la rivière aux Pékans. La similitude des débits observés et calculés aux deux stations hydrométriques confirme également que le modèle hydrologique CEQUEAU, tel qu'ajusté, permet de reproduire de façon satisfaisante les débits à n'importe quel point du bassin versant et que les variations hydrologiques observées entre le nord et le sud du bassin versant sont bien reproduites par le modèle.

De même, l'analyse des températures de l'eau observées et simulées montre que le modèle de température de l'eau couplé au modèle hydrologique CEQUEAU reproduit bien les températures de l'eau mesurées et peut être utilisé pour reproduire les températures de l'eau à n'importe quel point du bassin versant. Si on analyse les températures de l'eau calculées et mesurées pour l'année 1989 aux trois thermographes (figures 2.4 à 2.6) on voit que les variations du régime thermique observées entre le nord et le sud du bassin versant sont bien reproduites par le modèle.

Les données météorologiques étant disponibles nous avons pu calculer les températures de l'eau à plusieurs endroits sur les rivières du bassin versant naturel et aménagé pour la période 1961 à 1989.

L'ensemble des résultats montre que la précision du modèle est satisfaisante. L'erreur quadratique moyenne de 1°C calculé aux stations TMOI005 et TPEK007 montre également que la précision des températures de l'eau calculées par le modèle peut être considérée comme équivalente entre l'amont et l'aval du bassin versant.

La précision sur la différence des températures de l'eau en conditions naturelles et après détournement sans débit réservé est bien meilleur que celle calculée entre les températures de l'eau mesurées et calculées. Cette différence permet de voir les

tendances des changements du régime thermique dus au détournement de la rivière aux Pékans. L'analyse des différences à différents points du bassin versant permet également de voir qu'elles diminuent très rapidement de l'amont à l'aval du bassin versant.

Les différences de température de l'eau de la rivière Moisie, causées par le détournement de la rivière aux Pékans, sont très faibles en comparaison des variations naturelles.

Nous croyons que les modifications du régime thermique de la rivière Moisie, causées par le détournement de la rivière aux Pékans, sont beaucoup plus faibles que les modifications qui peuvent se produire par le réchauffement prévu par l'effet de serre. A titre d'exemple, le modèle de circulation général du Centre climatologique canadien du service de l'environnement atmosphérique d'Environnement Canada, prévoit qu'avec 2CO_2 les températures moyennes de l'air pour les mois d'été vont augmenter de $3,6^\circ\text{C}$ à la station de Sept-Iles et de $4,3^\circ\text{C}$ à la station de Wabush. Les variations des précipitations, estimées pour la même période sont de $-7,1\%$ et $-0,5\%$ respectivement.

RÉFÉRENCES

RÉFÉRENCES

CORPS OF ENGINEERS U.S. ARMY (1960).

"Runoff from snowmelt". EM 1110-2-1406.

GRAY, D.M., McKAY, G.A. et WIGHAM, J.M. (1972).

Énergie, évaporation et évapotranspiration. Dans: Manuel des principes d'hydrologie (édité par D.M. Gray). Conseil national de recherches du Canada, Ottawa.

MARCOTTE, N. et DUONG, V.L. (1973).

Le calcul de la température de l'eau des rivières. J. Hydrol., 18(3/4): 273-287.

MORIN, G., FORTIN, J.P., LARDEAU, J.P., SOCHANSKI, W. et S. PAQUETTE, (1981).

Modèle CEQUEAU: manuel d'utilisation. INRS-Eau rapport scientifique no 93, 449 p.

MORIN, G., CLUIS, D., COUILLARD, D., JONES, H.G. et GAUTHIER, J.M. (1983).

Modélisation de la température de l'eau à l'aide du modèle quantité-qualité CEQUEAU. INRS-Eau, rapport scientifique no 153, 103 p. (Pour Hydro-Québec).

MORIN, G., CLUIS, D., COUILLARD, D., JONES, H.G. et GAUTHIER, J.M. (1987).

Prévision des températures de l'eau en rivière à l'aide d'un modèle conceptuel. Journal des sciences hydrologiques, 32(1): 31-41.

NASH, J.E. and SUTCLIFFE, J.V. (1970).

"Riverflow forecasting through conceptual model". Journal of Hydrology, 10, 282-290.

NOBLE, R.D. and CARROLL, T.A. (1982).

Analytical Prediction of vertical temperature distribution in large water bodies.
J. Environmental Systems, 11(2): 131-138.

RAPHAEL, J.M. (1962).

Prediction of temperature in rivers and reservoirs. Proc. Am. Soc. Civ. Eng.,
J. Power Div., 88: 157-181.

ANNEXE A

GRAPHIQUES DES TEMPÉRATURES DE L'EAU

JOURNALIERES AU SITE:

MOISIE A LA STATION 072301

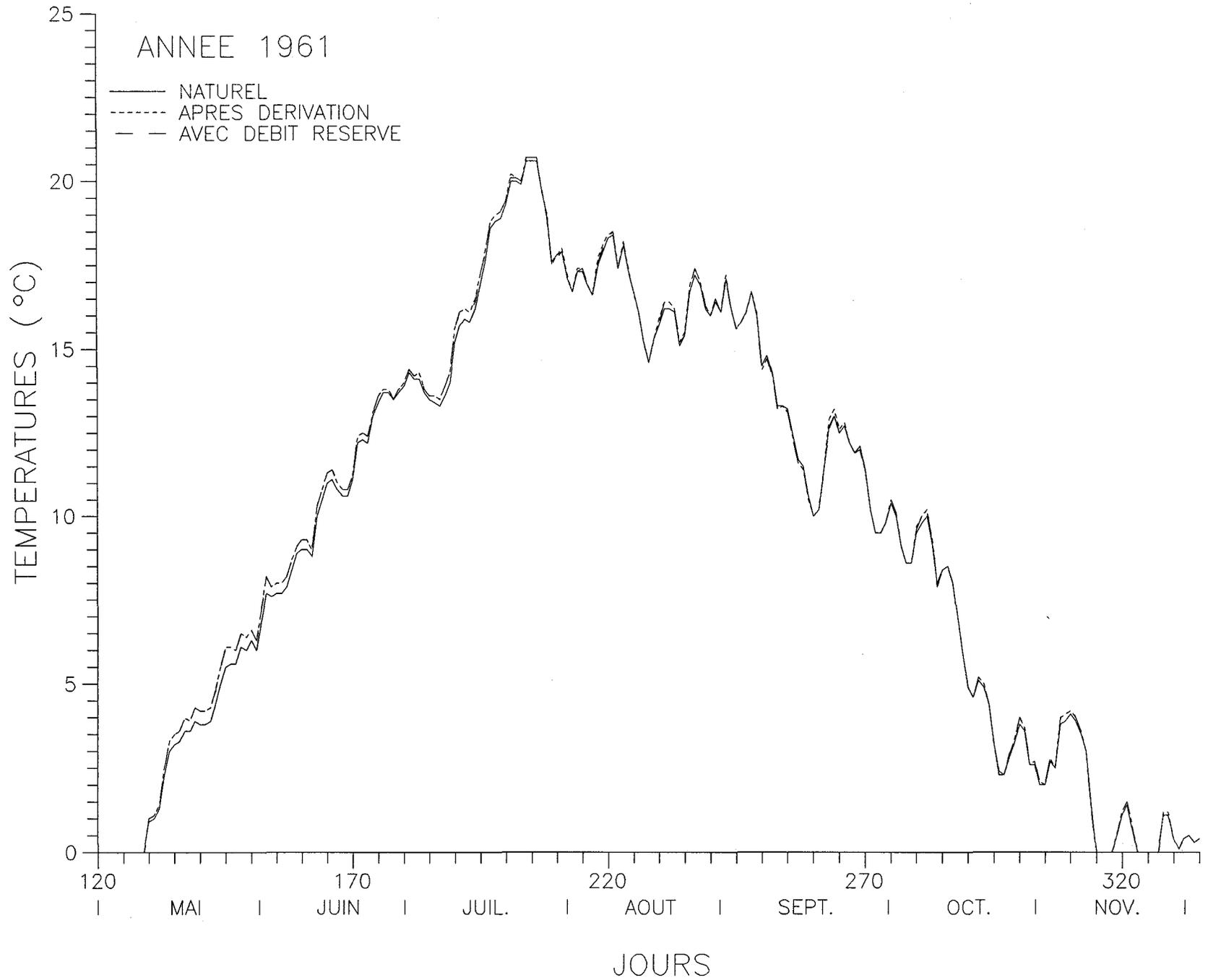


Figure A1 Temperature journaliere de l'eau: Moisie a la station 072301

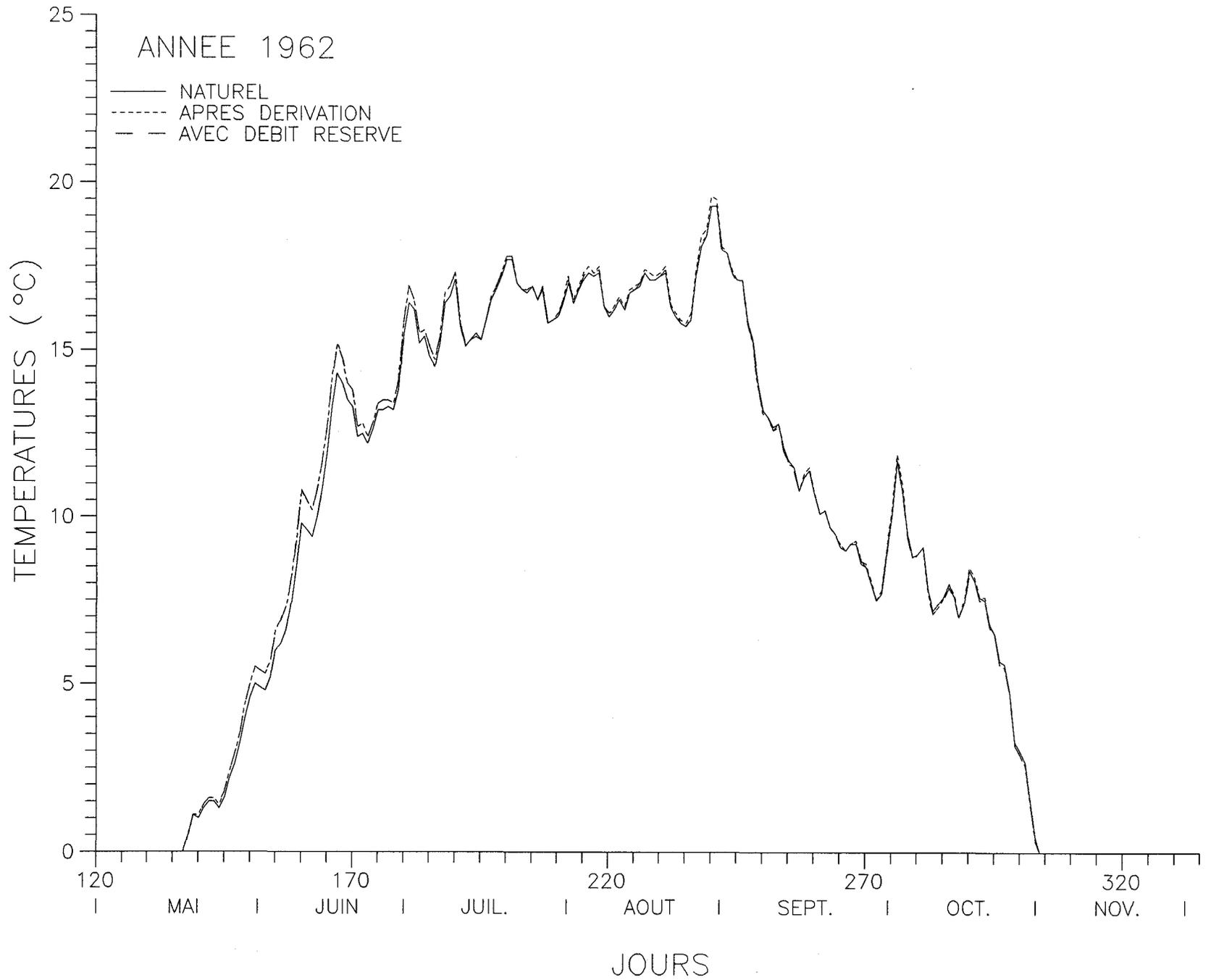


Figure A2 Temperature journaliere de l'eau: Moisie a la station 072301

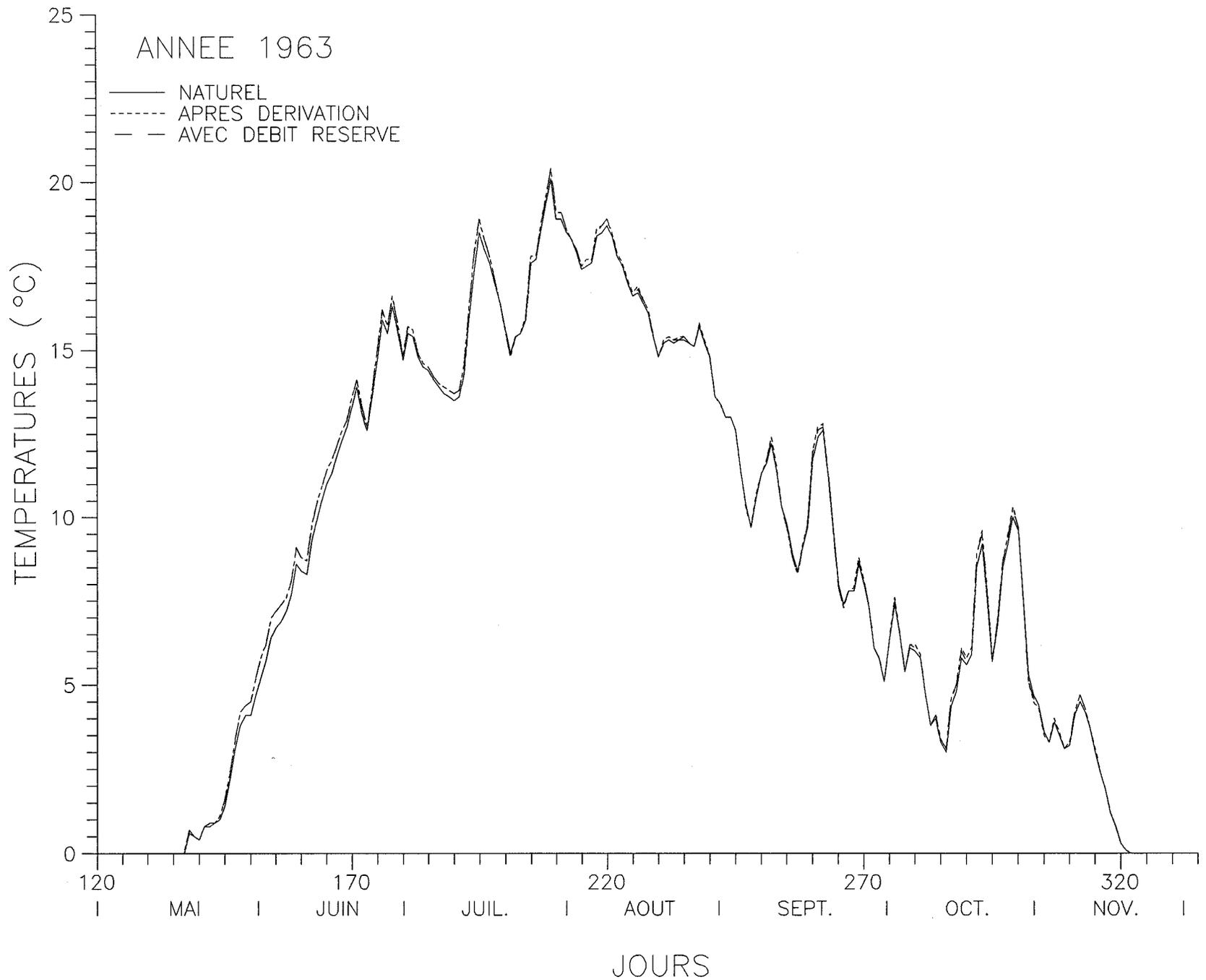


Figure A3 Temperature journaliere de l'eau: Moisie a la station 072301



Figure **A4** Temperature journaliere de l'eau: Moisie a la station 072301

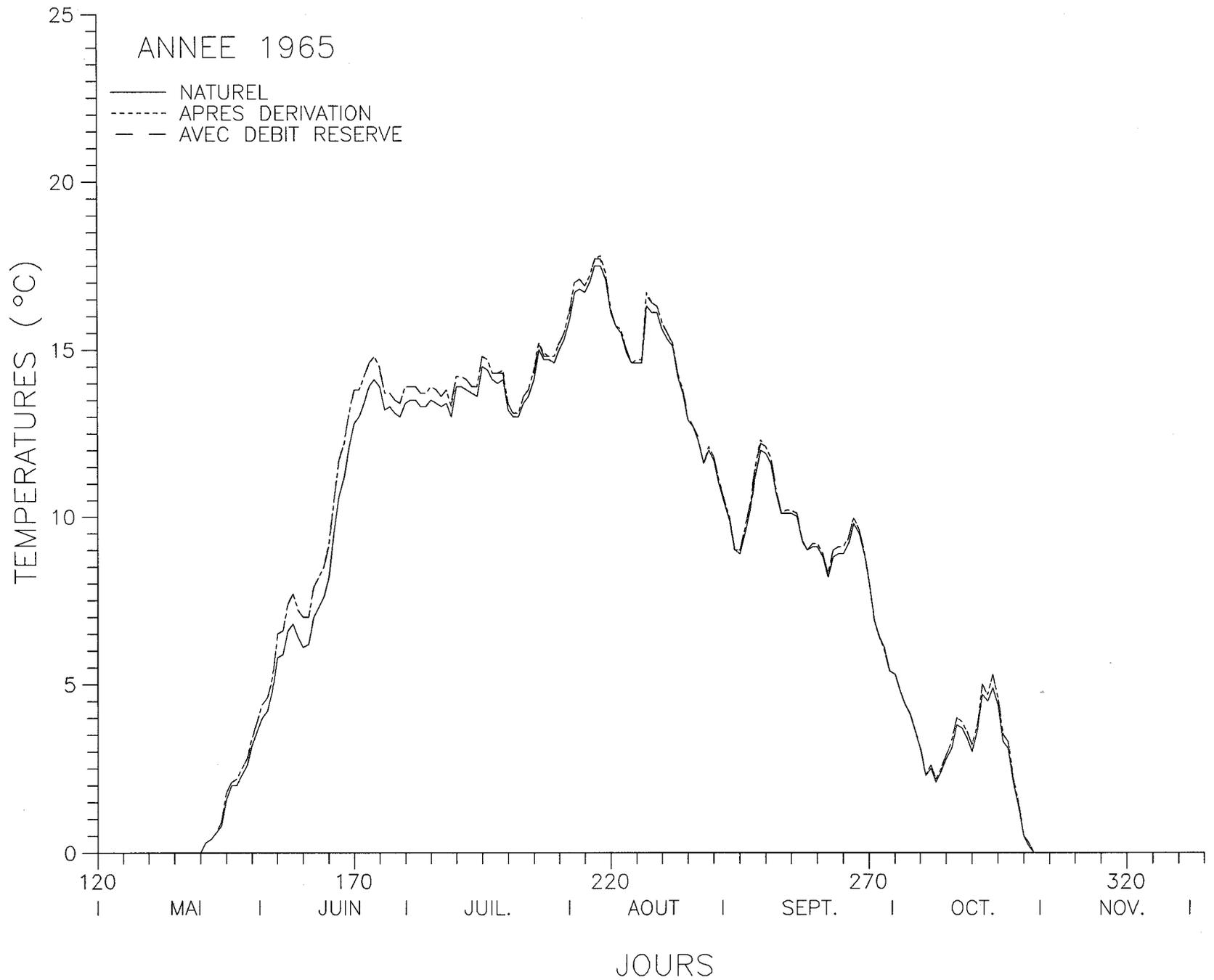


Figure **A5** Temperature journaliere de l'eau: Moisie a la station 072301

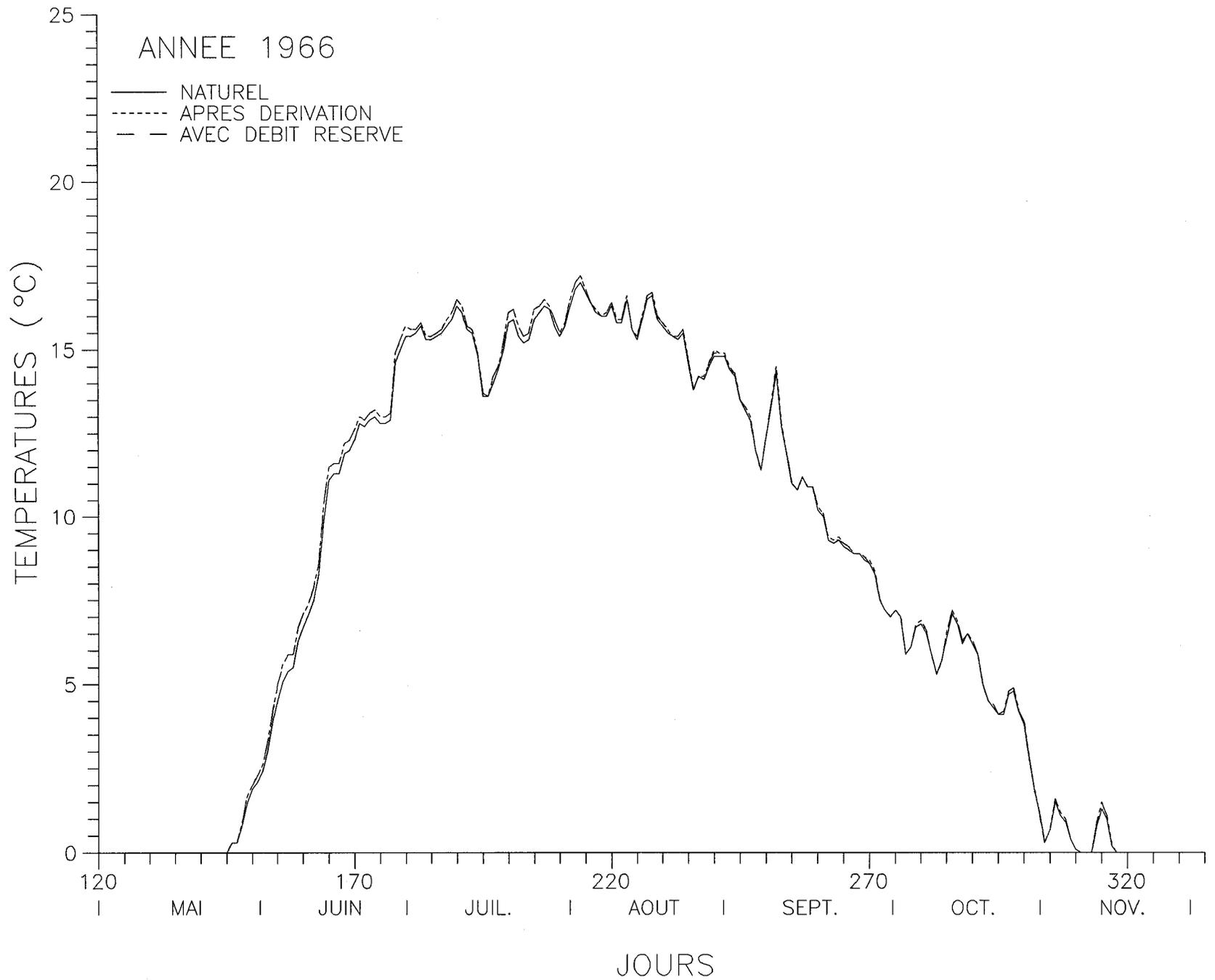


Figure **A6** Temperature journaliere de l'eau: Moisie a la station 072301



Figure A7 | Temperature journaliere de l'eau: Moisie a la station 072301

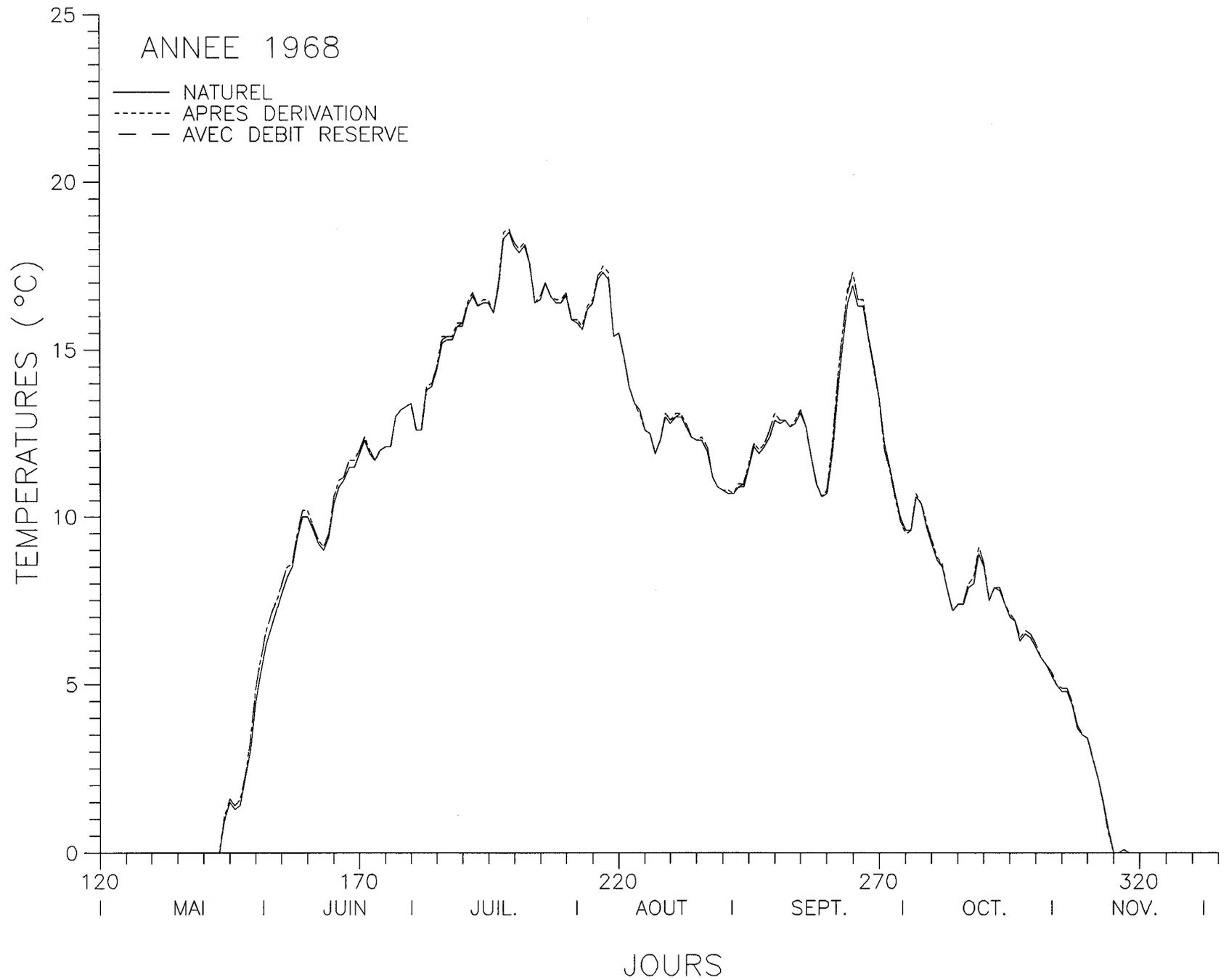


Figure A8 Temperature journaliere de l'eau: Moisie a la station 072301

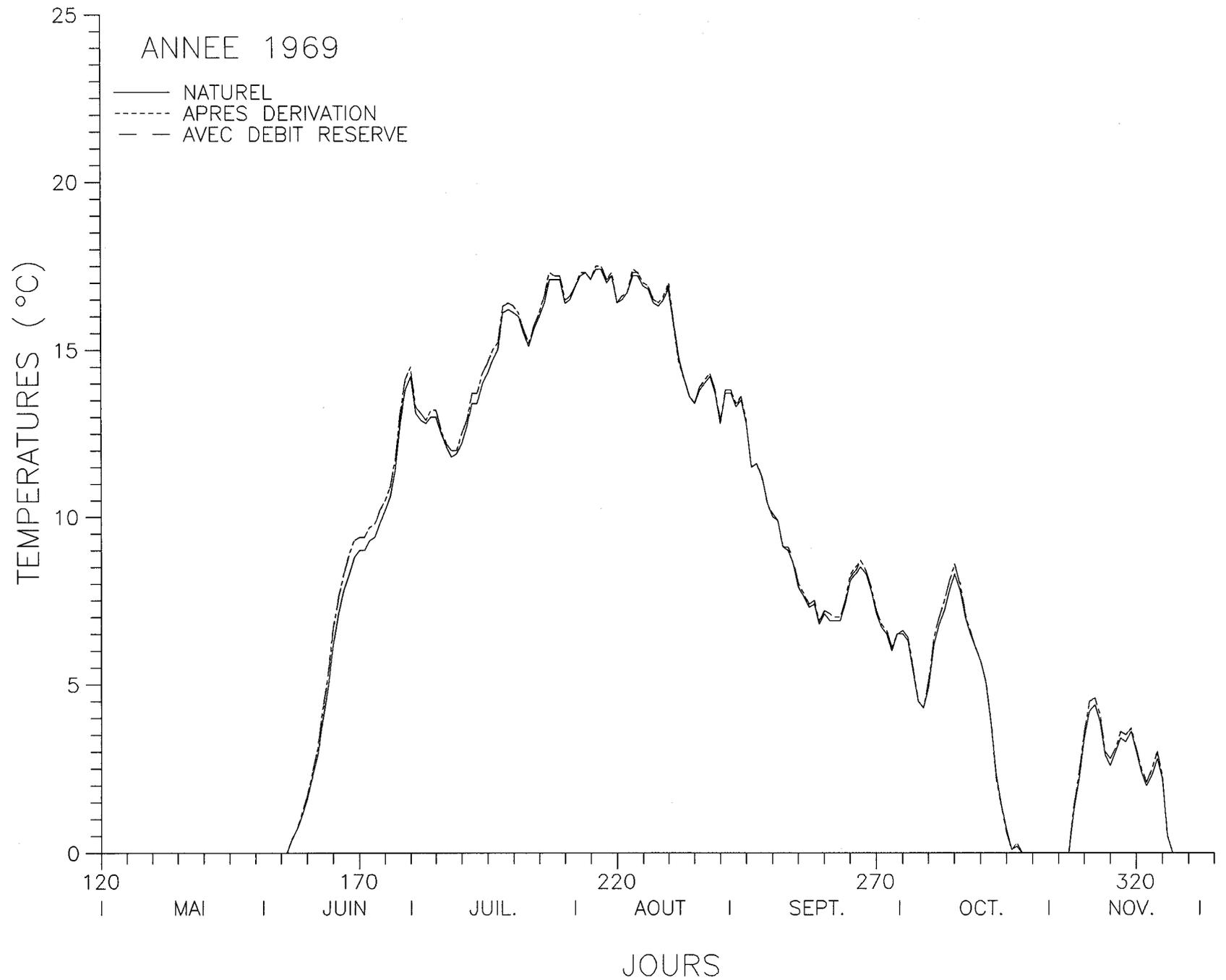


Figure A9: Temperature journalière de l'eau: Moisie a la station 072301

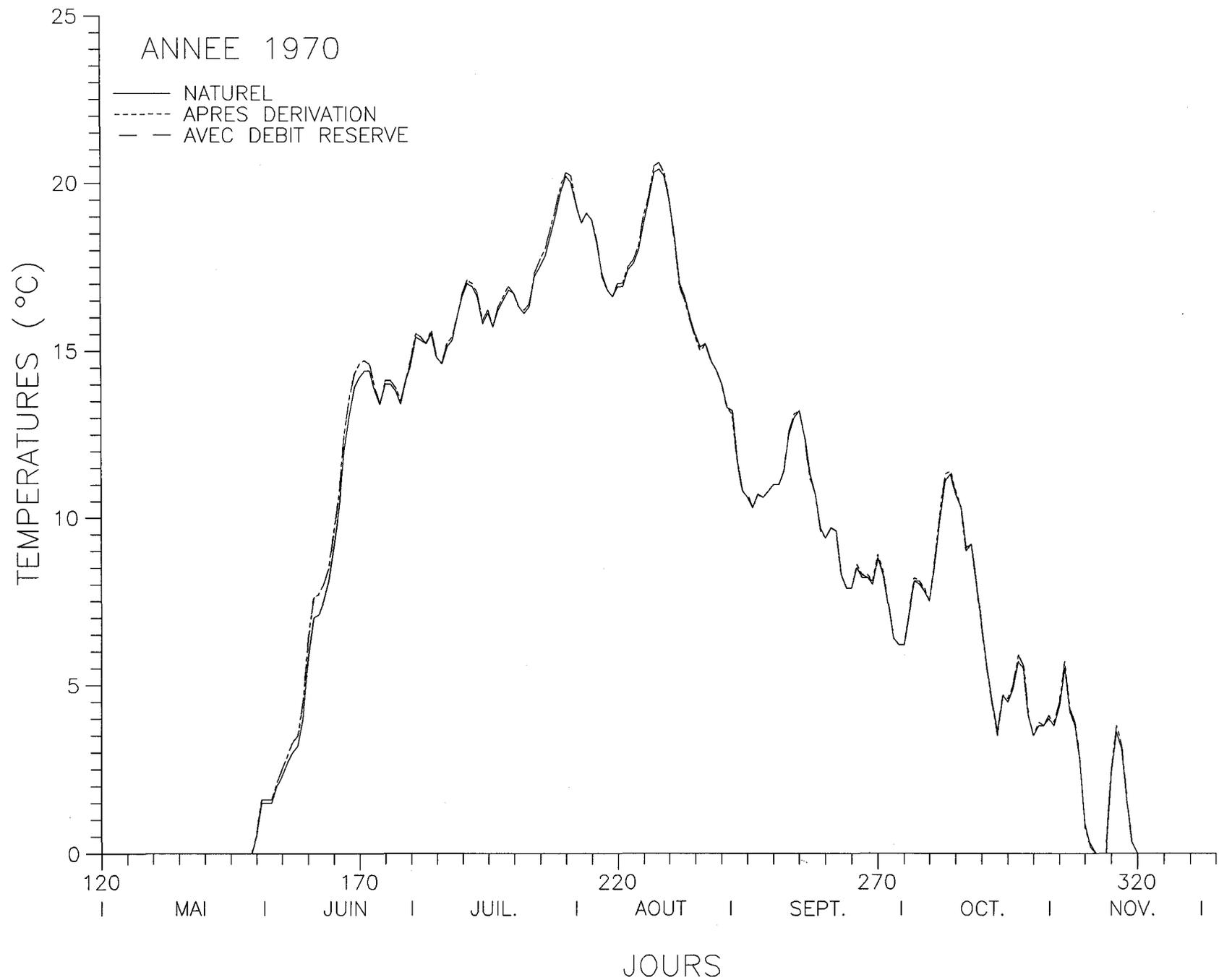


Figure A10 Temperature journaliere de l'eau: Moisie a la station 072301

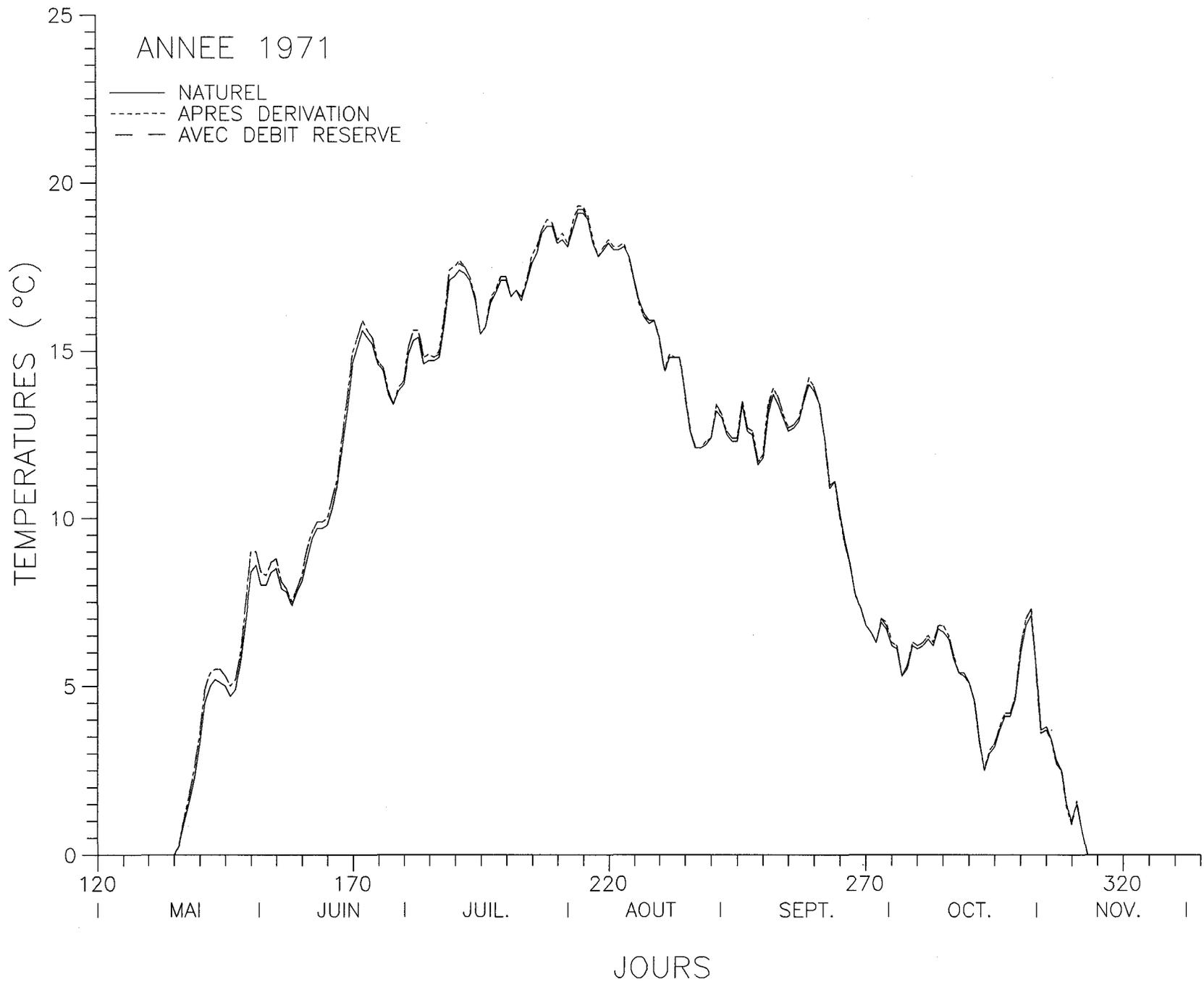


Figure **A11** Temperature journaliere de l'eau: Moisie a la station 072301

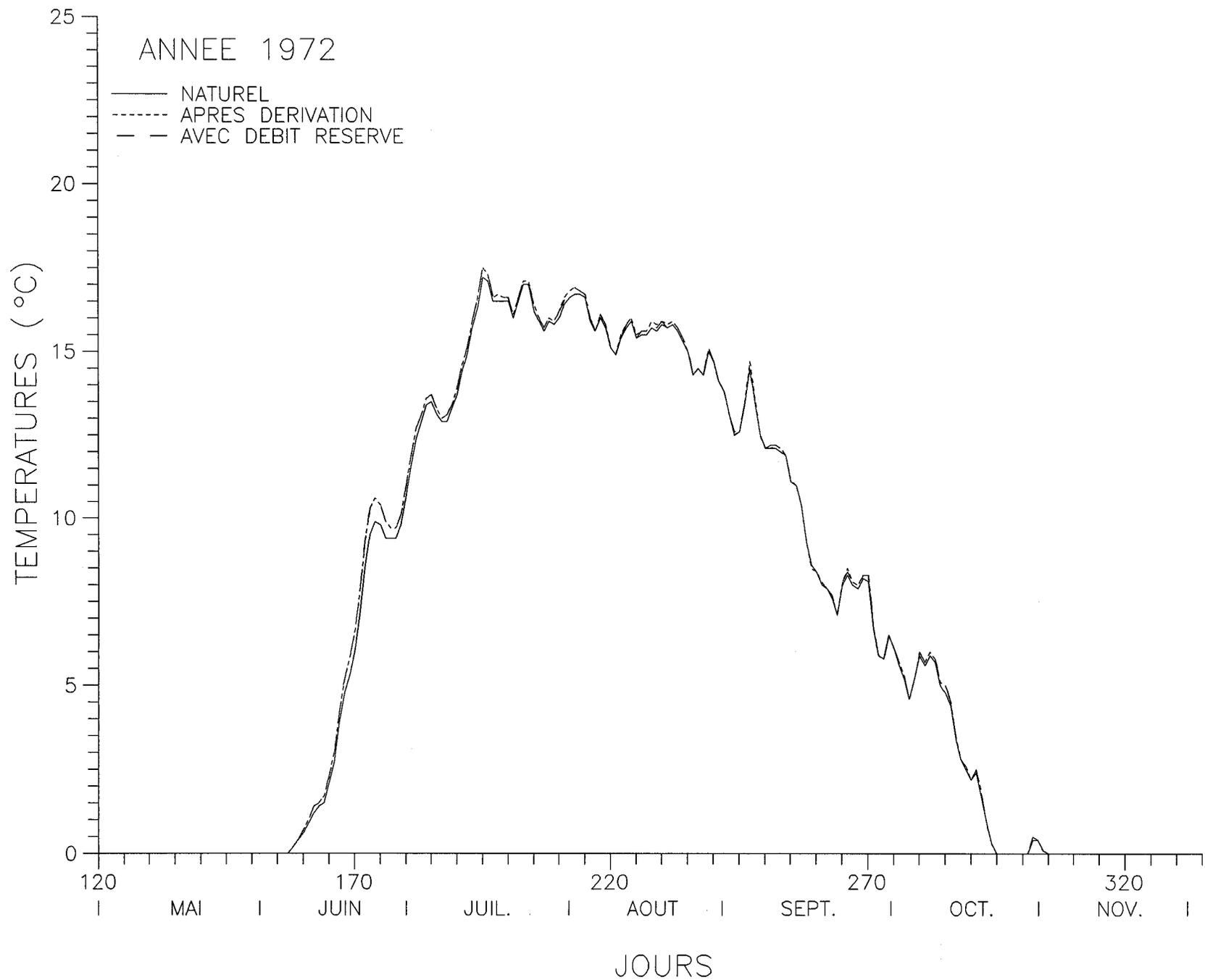


Figure **A12** Temperature journaliere de l'eau: Moisie a la station 072301

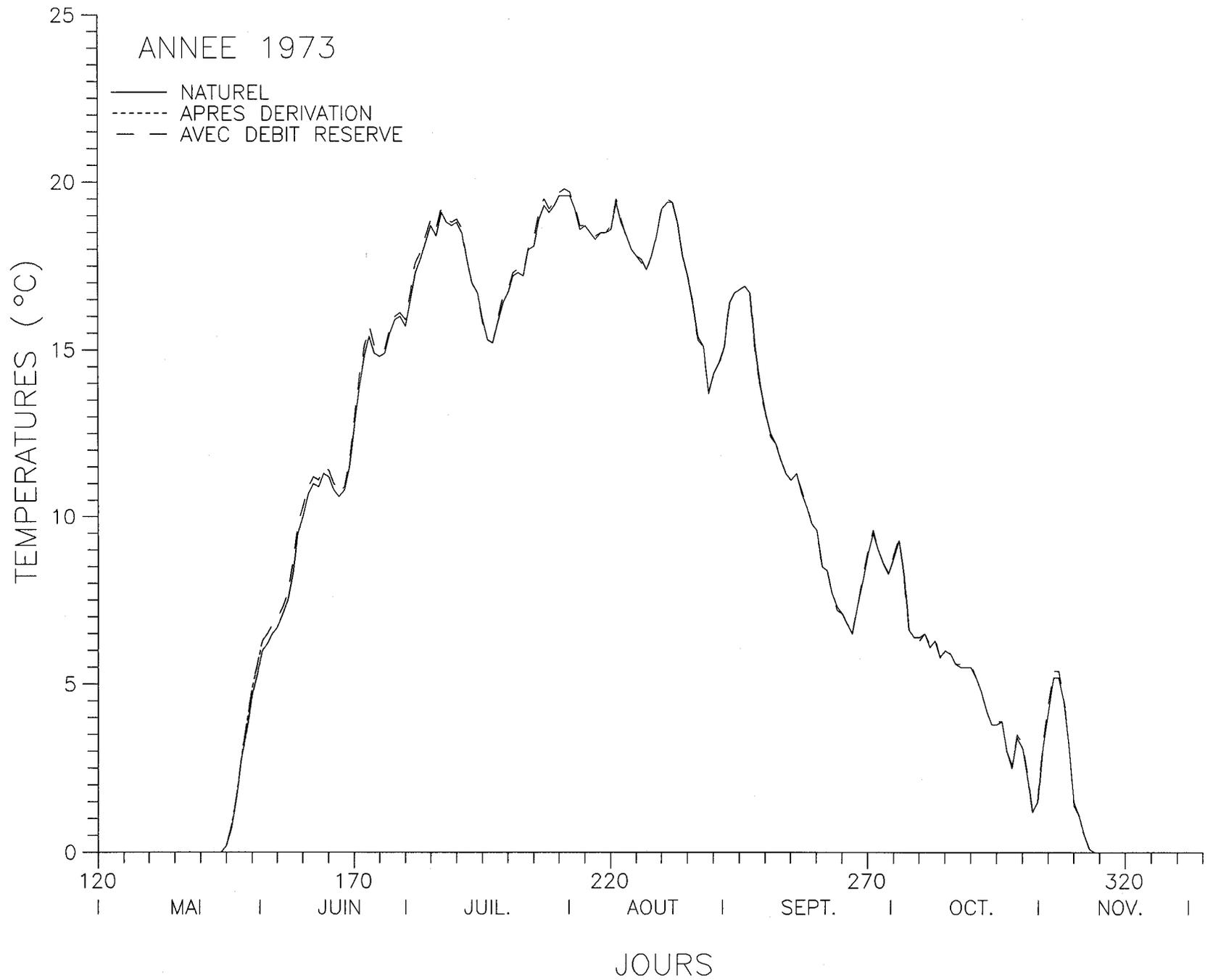


Figure A13 Temperature journaliere de l'eau: Moisie a la station 072301

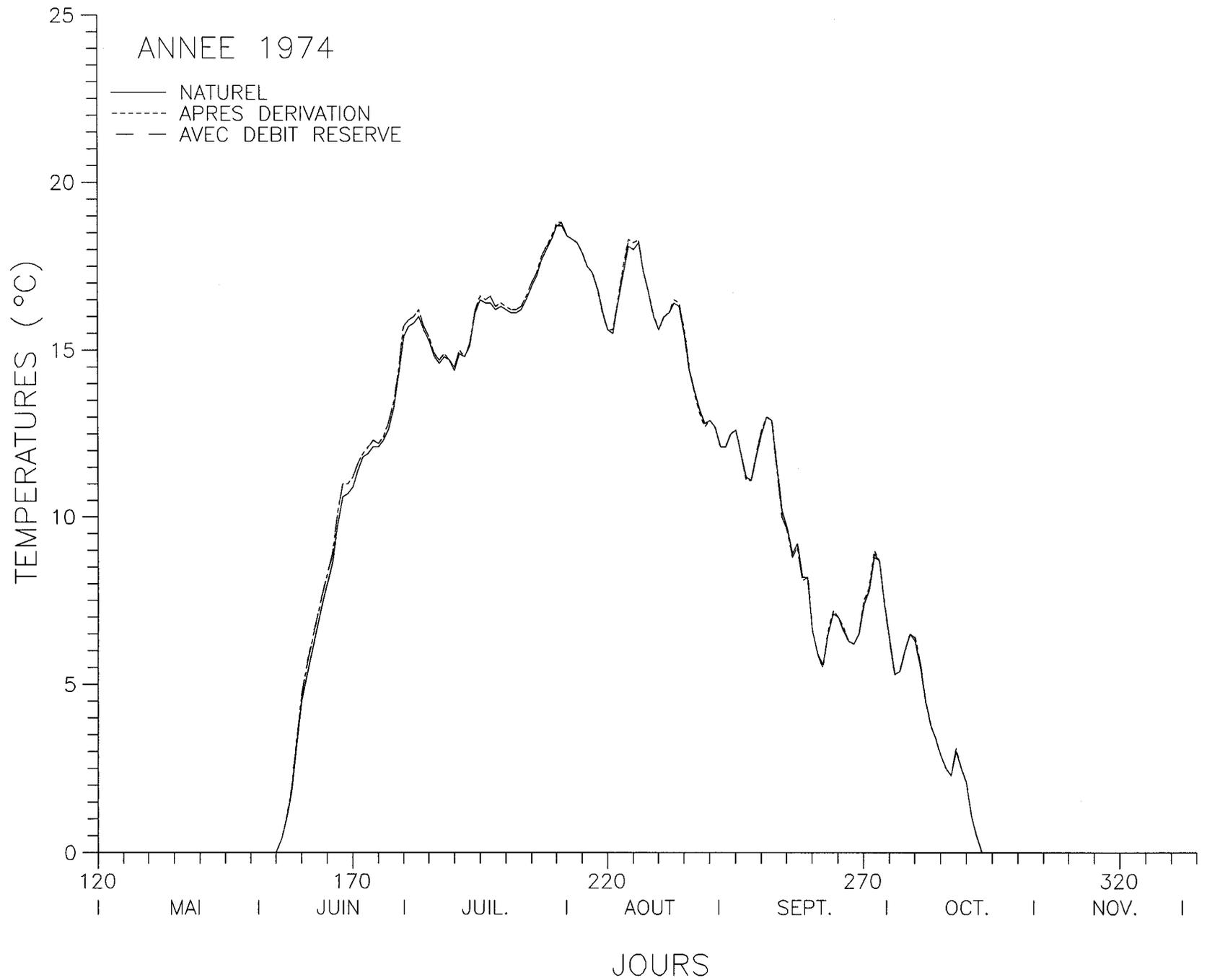


Figure A14 Temperature journaliere de l'eau: Moisie a la station 072301

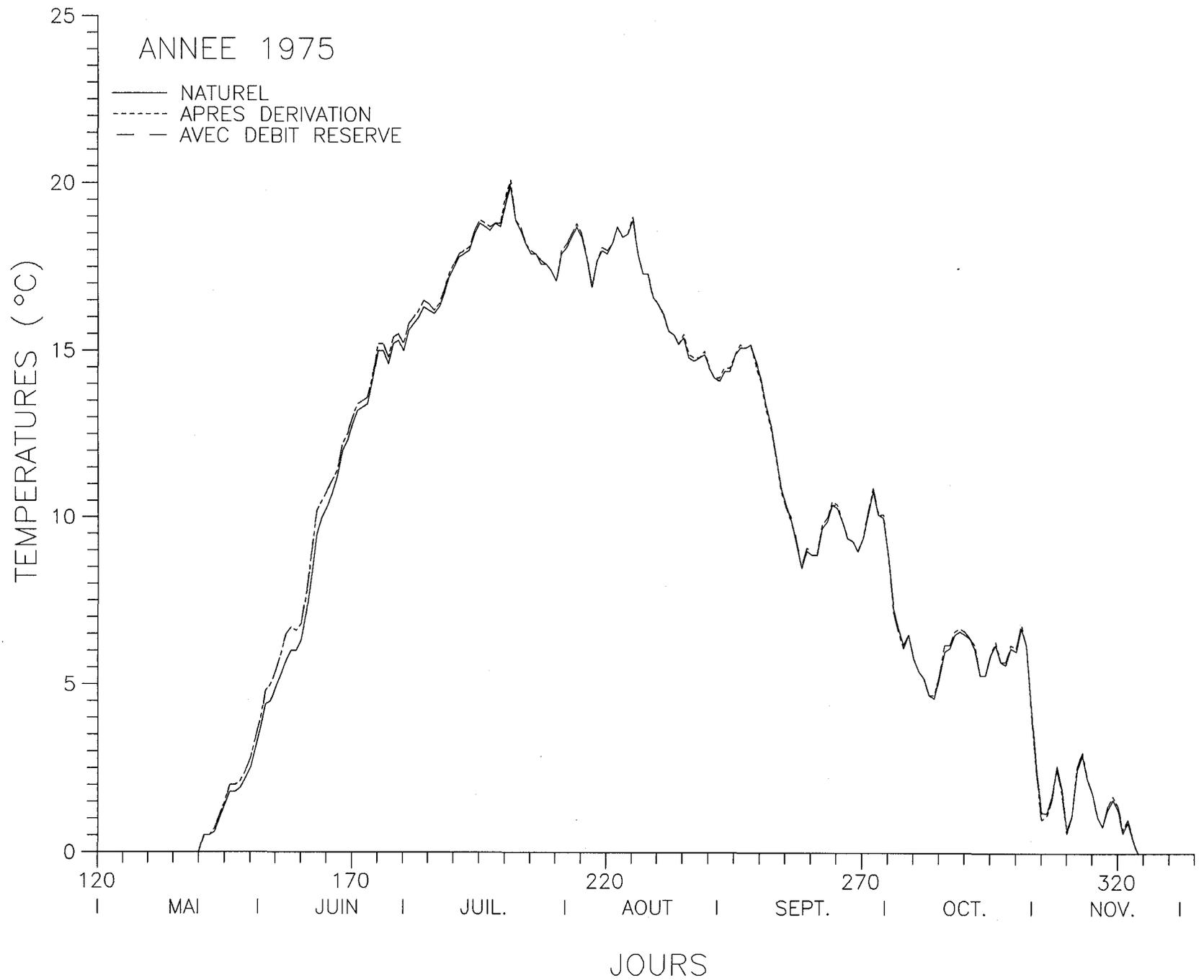


Figure **A15** Temperature journaliere de l'eau: Moisie a la station 072301

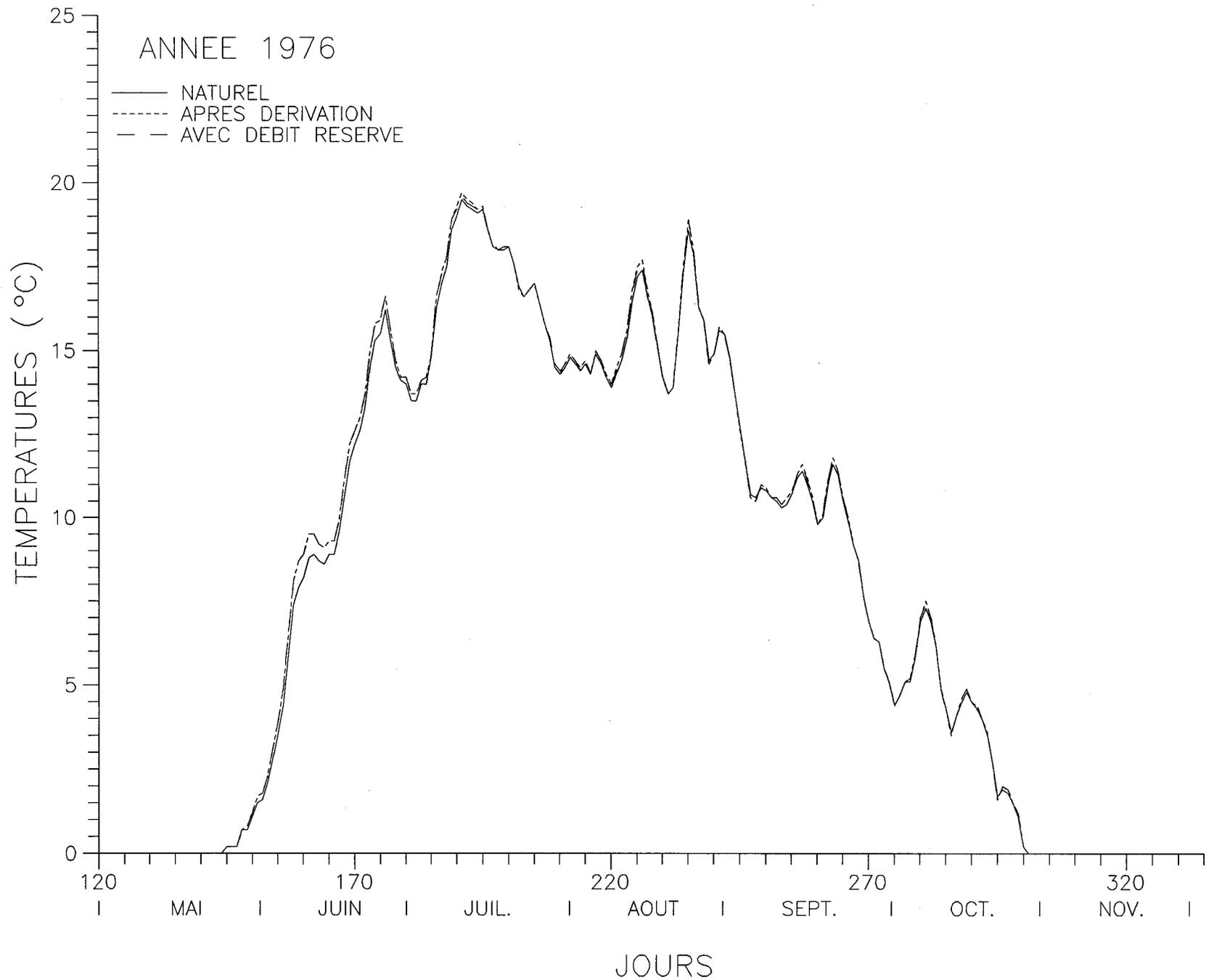


Figure A16 Temperature journaliere de l'eau: Moisie a la station 072301

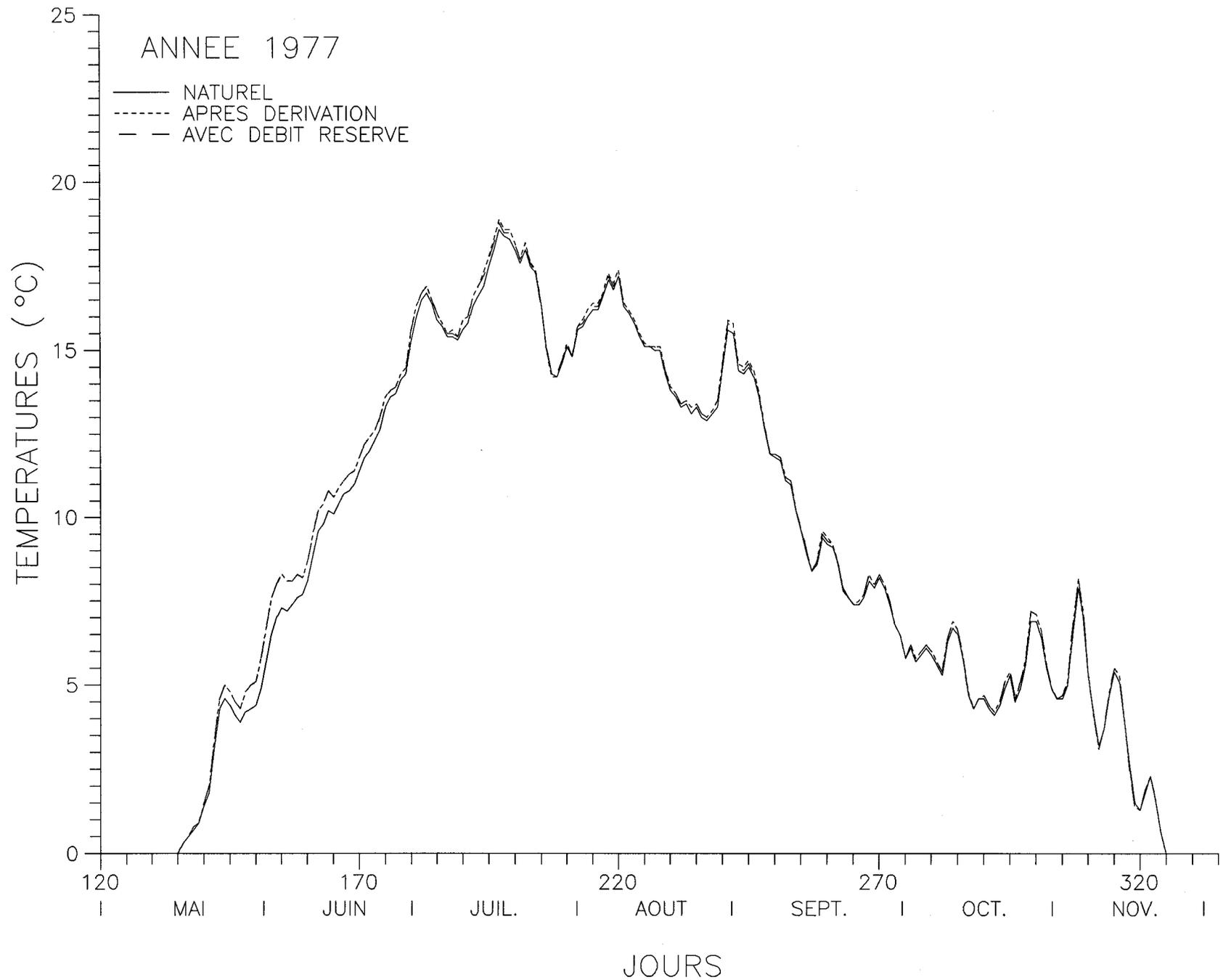


Figure A17 Temperature journaliere de l'eau: Moisie a la station 072301



Figure **A18** Temperature journaliere de l'eau: Moisie a la station 072301



Figure A19 Temperature journaliere de l'eau: Moisie a la station 072301

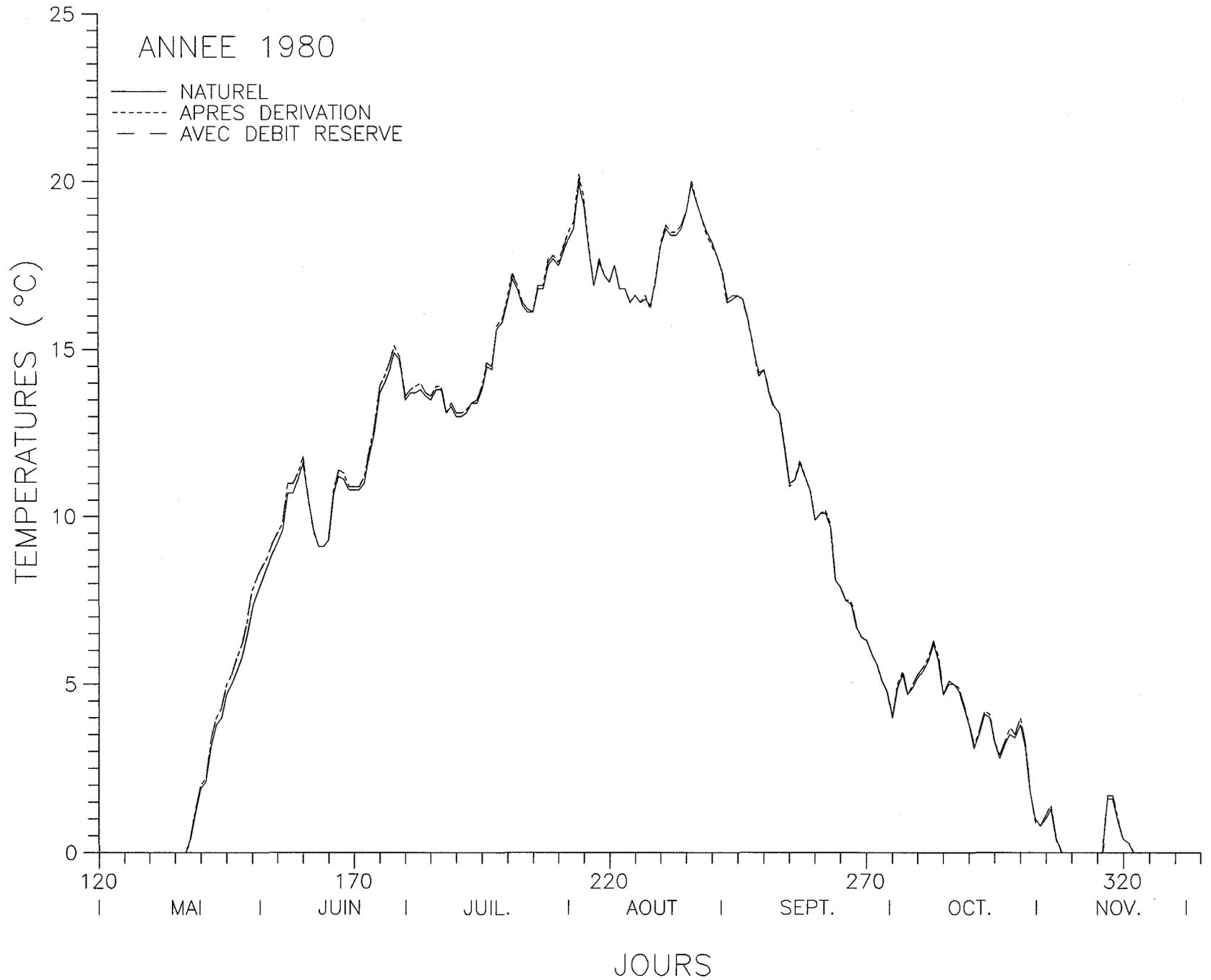


Figure A20 Temperature journaliere de l'eau: Moisie a la station 072301

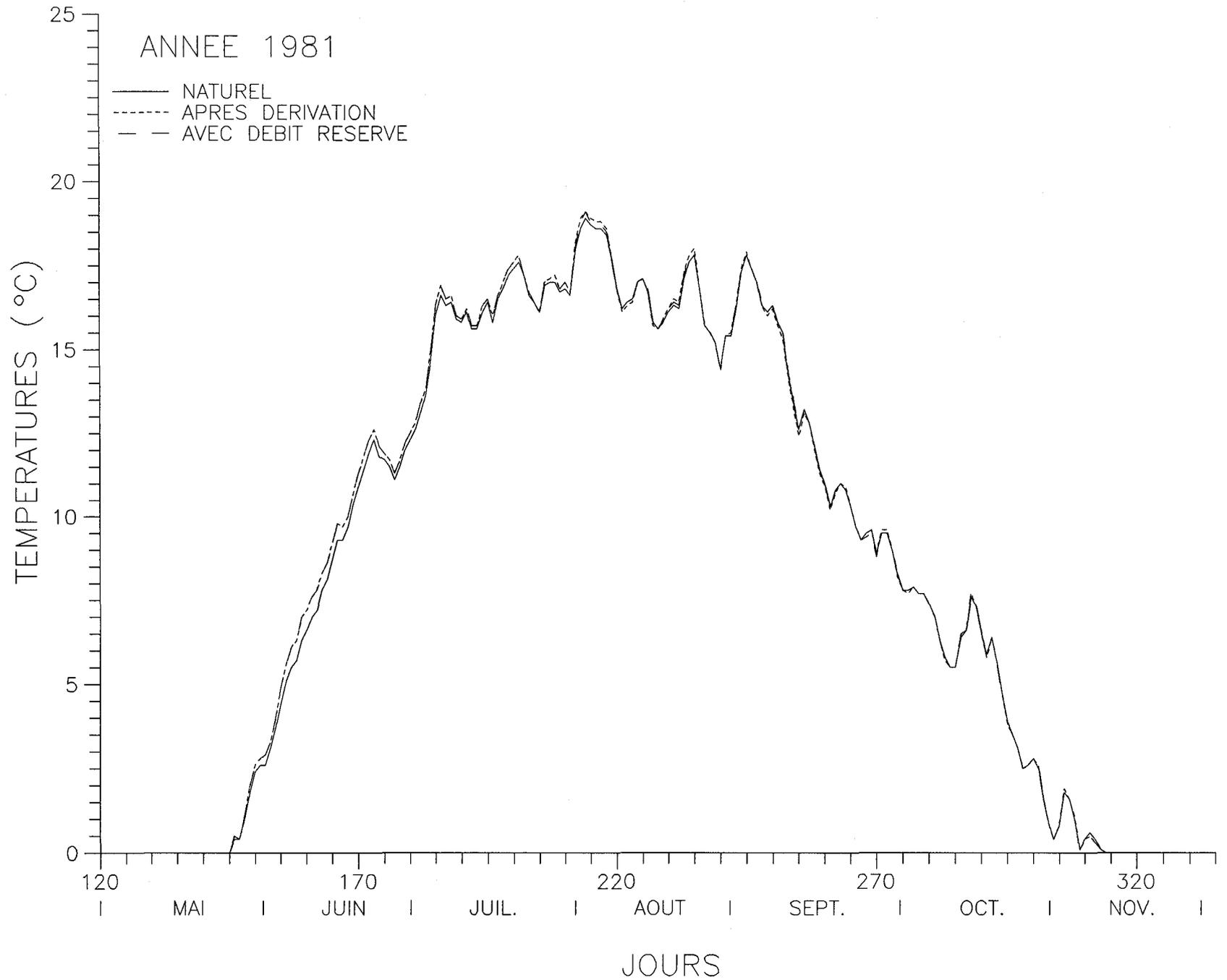


Figure **A21** Temperature journaliere de l'eau: Moisie a la station 072301

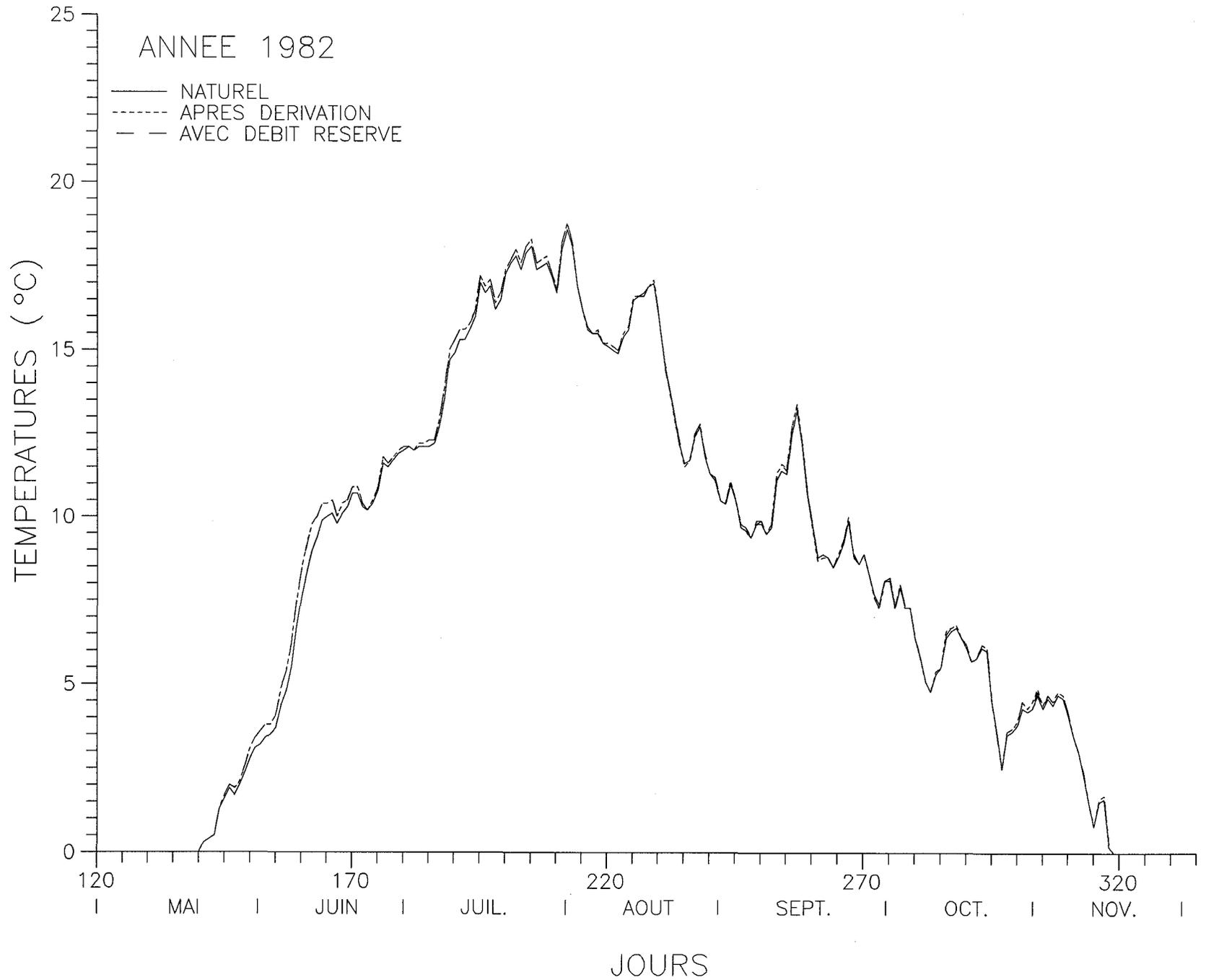


Figure A22 Temperature journalière de l'eau: Moisie a la station 072301

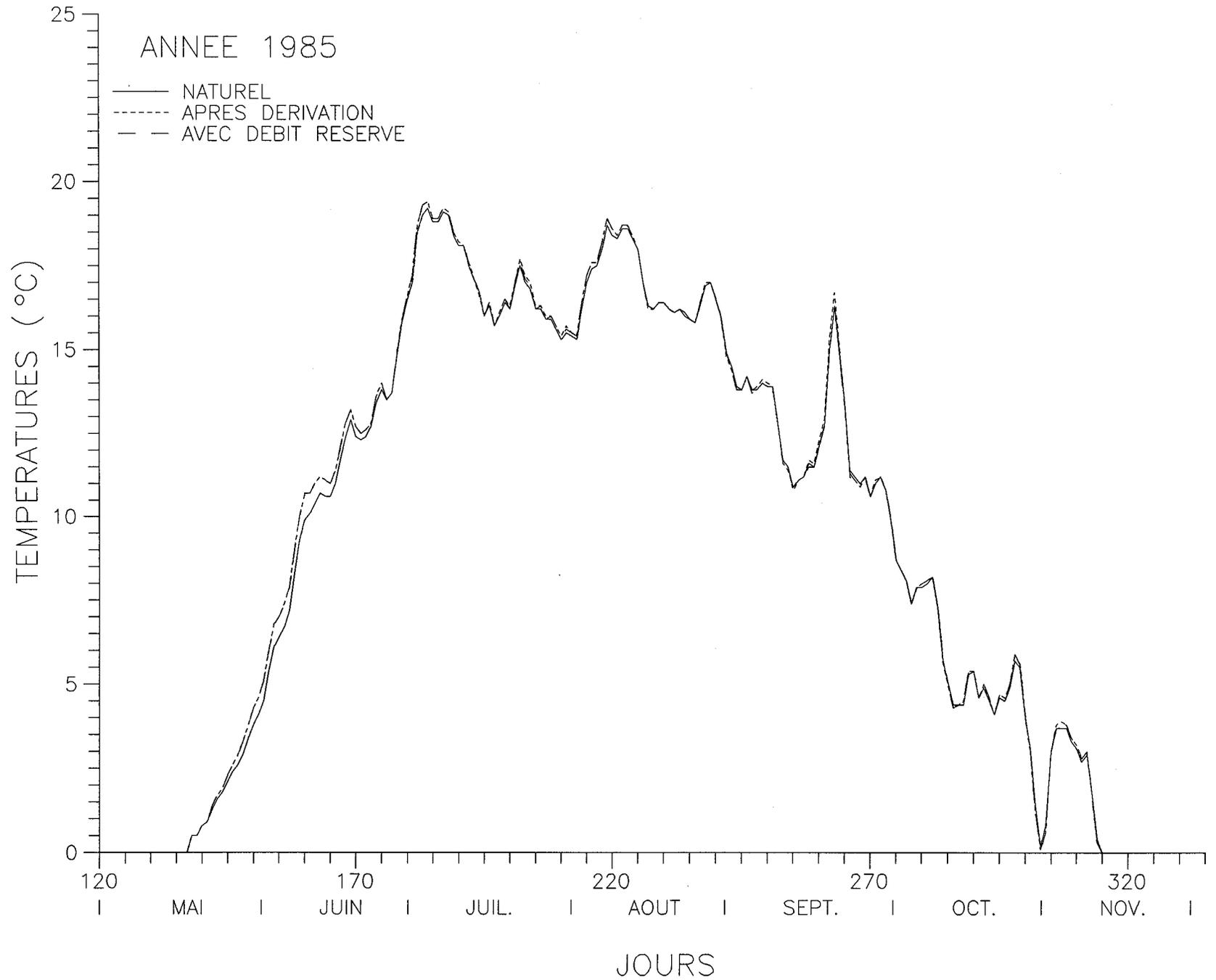


Figure A25 Temperature journaliere de l'eau: Moisie a la station 072301

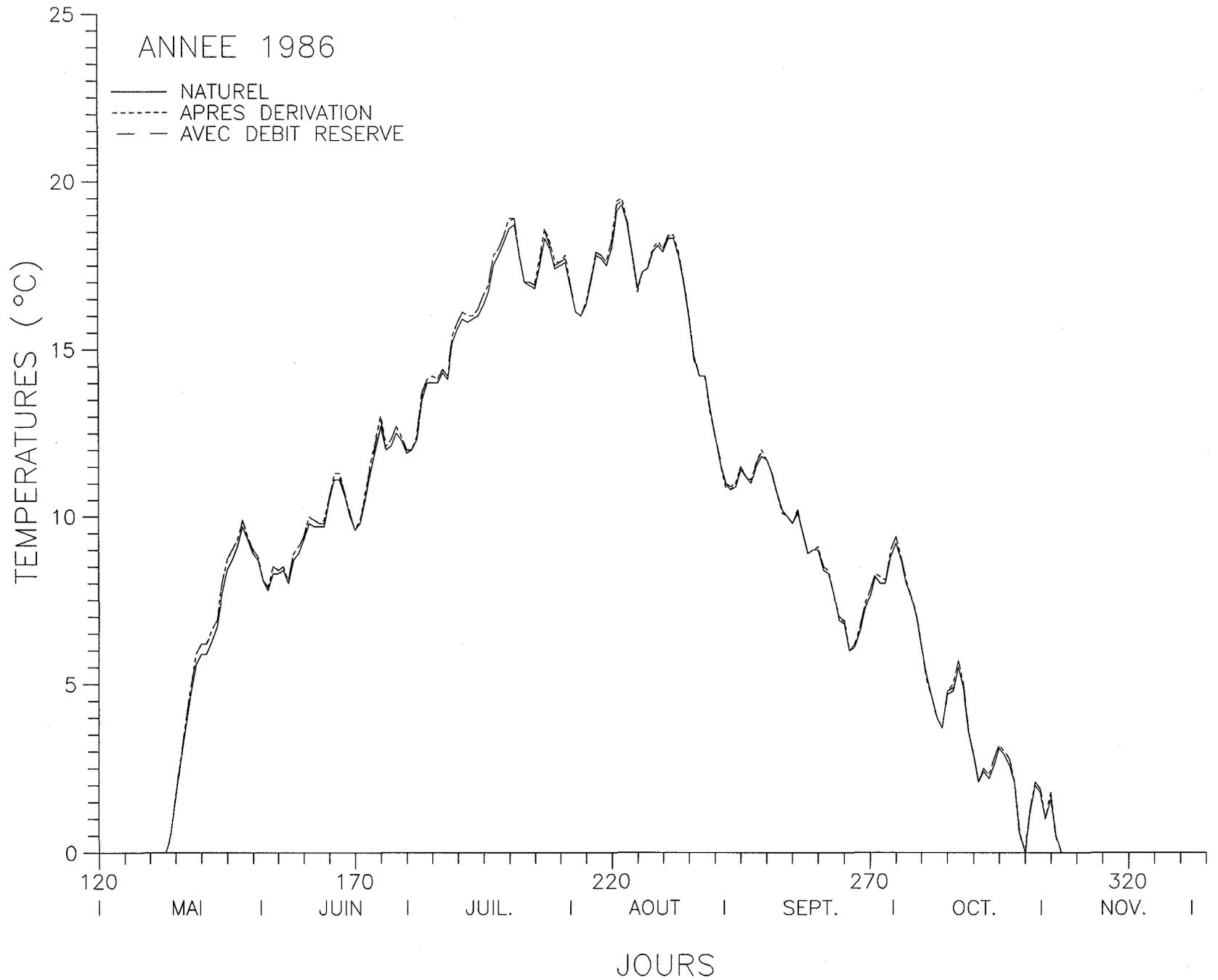


Figure A26 Temperature journaliere de l'eau: Moisie a la station 072301



Figure **A27** Temperature journaliere de l'eau: Moisie a la station 072301

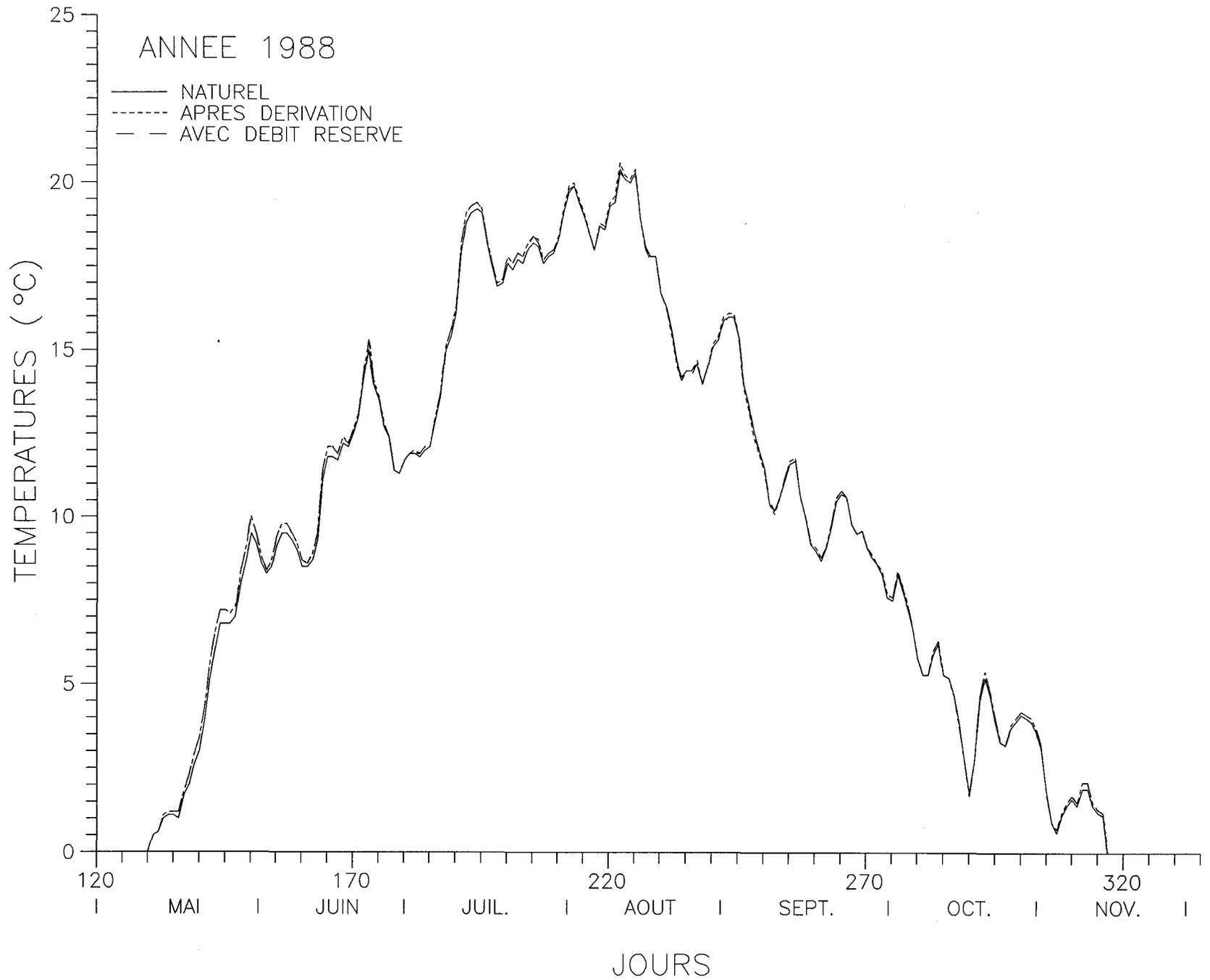


Figure **A28** Temperature journaliere de l'eau: Moisie a la station 072301



Figure A29. Temperature journalière de l'eau: Moisie a la station 072301

ANNEXE B

GRAPHIQUES DES TEMPÉRATURES DE L'EAU

JOURNALIERES AU SITE:

MOISIE EN AVAL DE LA RIVIERE AUX PÉKANS

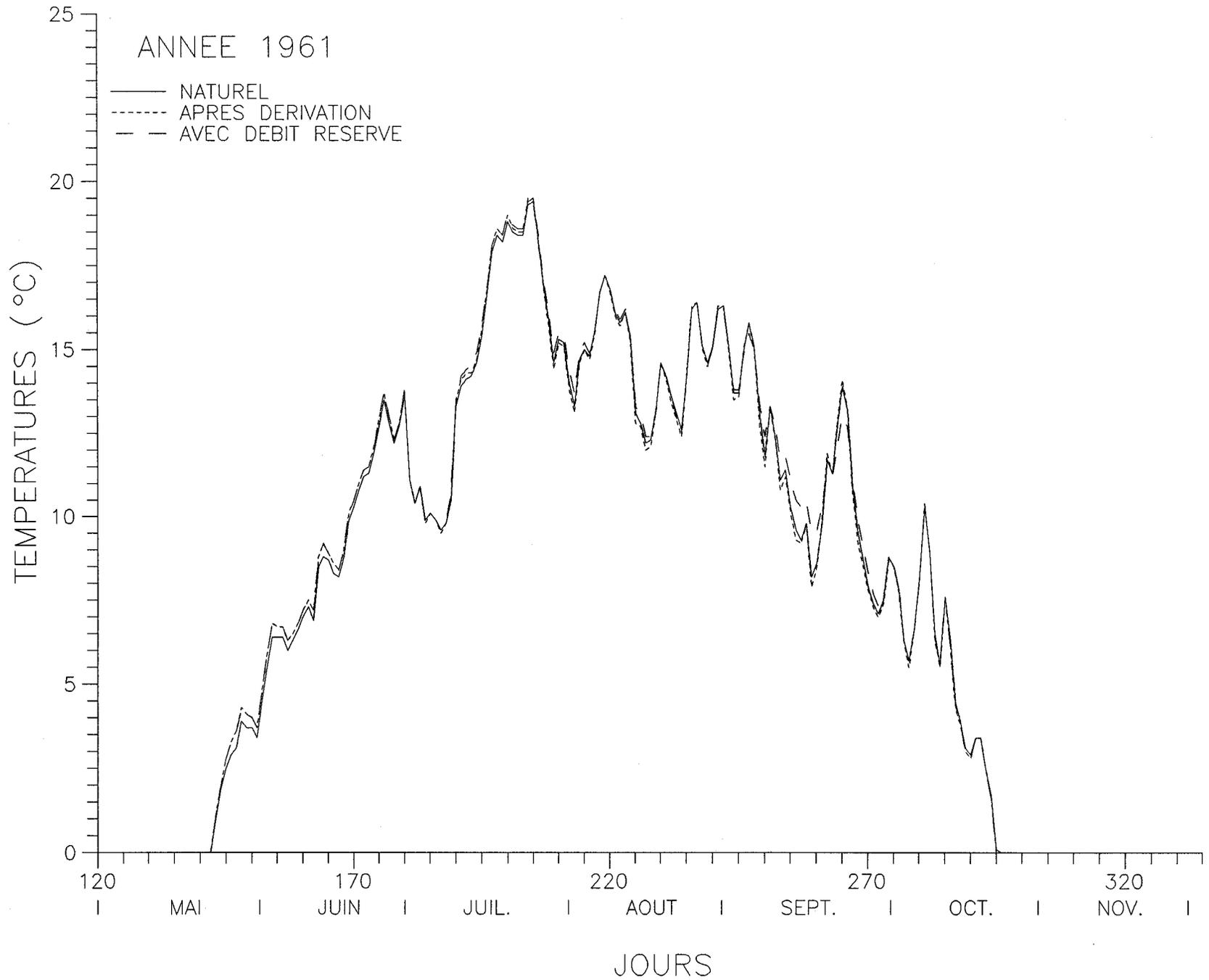


Figure B1 Temperature journaliere de l'eau: Moisie en aval de la riviere aux Pekans

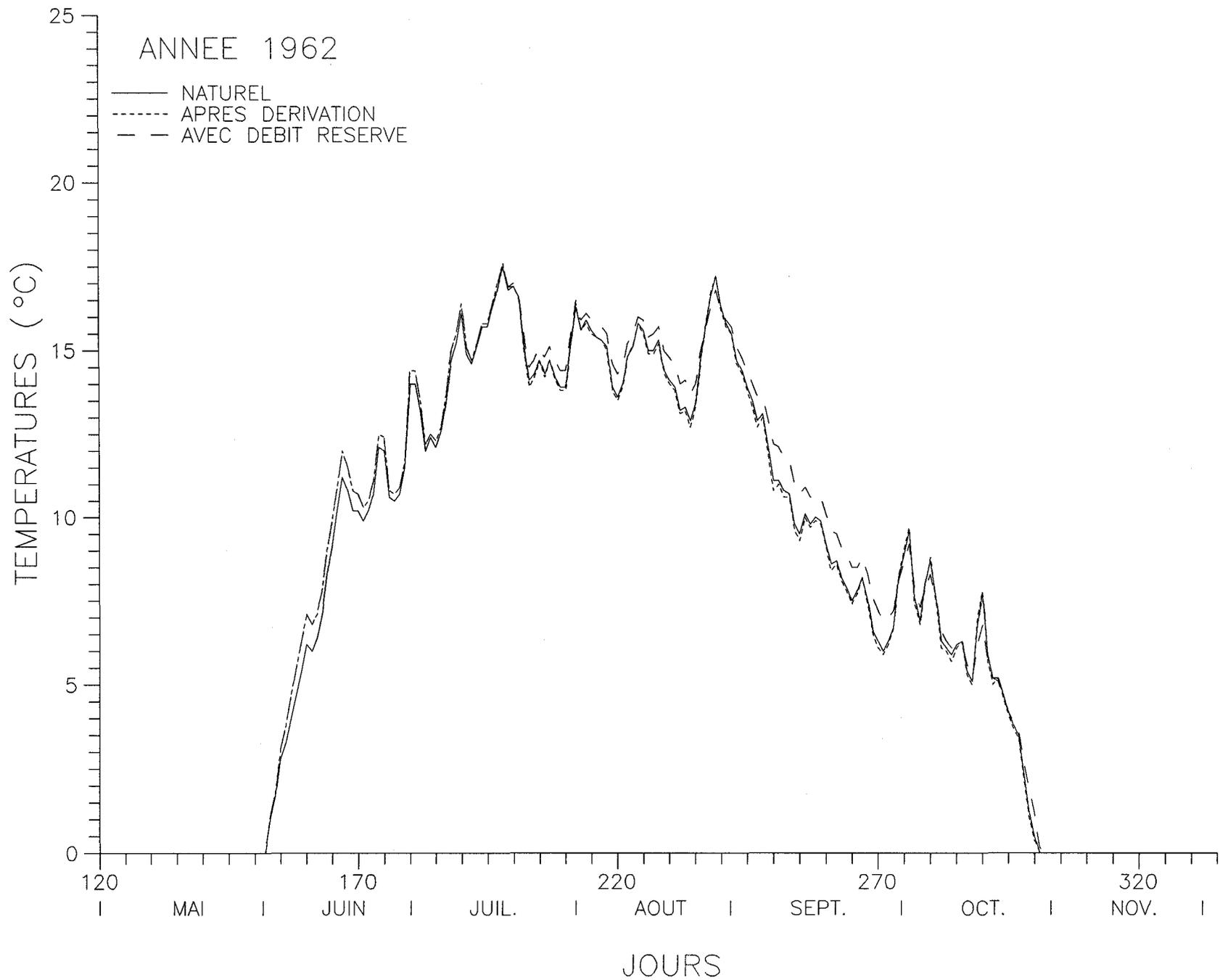


Figure B2 Temperature journaliere de l'eau: Moisie en aval de la riviere aux Pekans

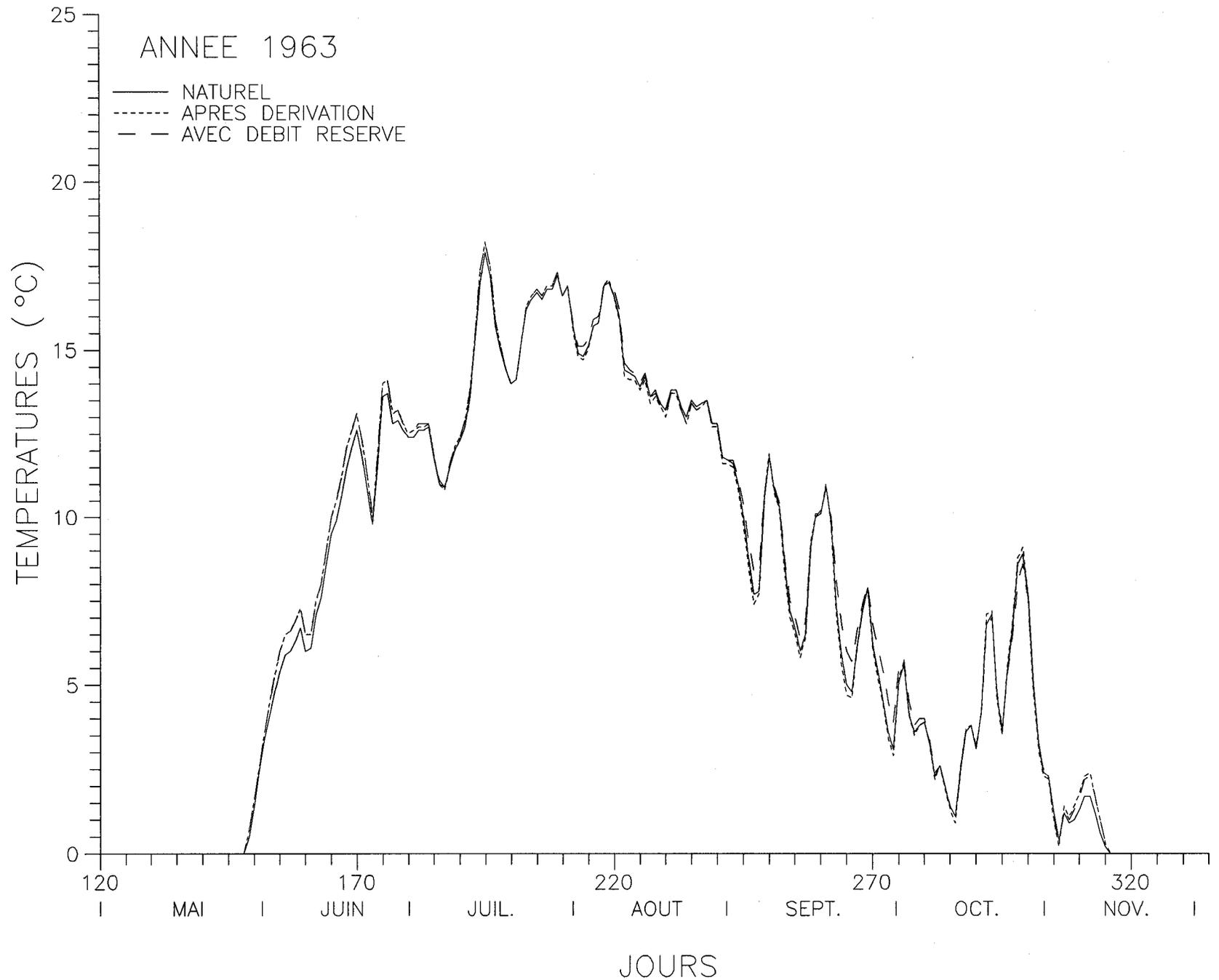


Figure B3 Temperature journaliere de l'eau: Moisie en aval de la riviere aux Pekans

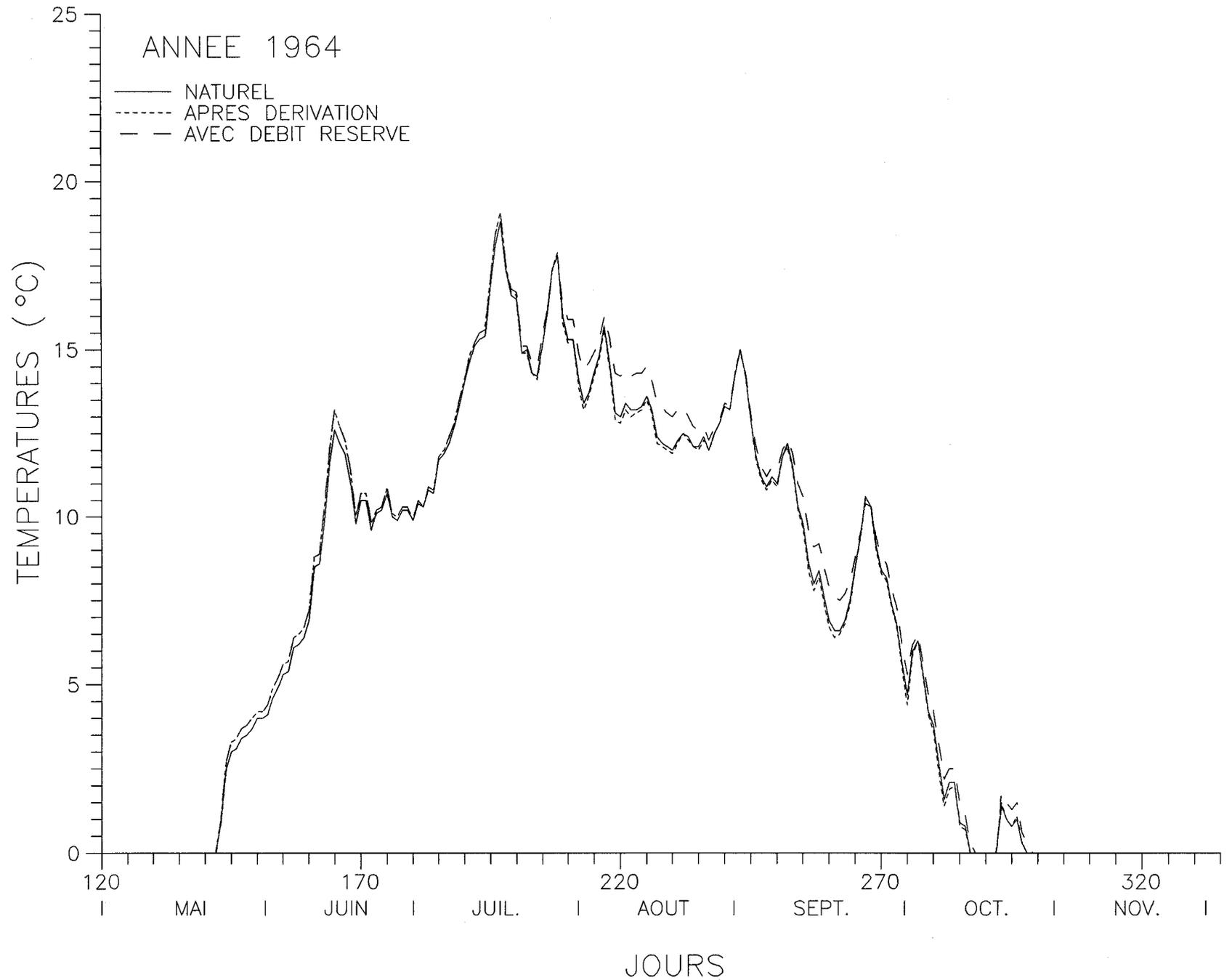


Figure B4 Temperature journaliere de l'eau: Moisie en aval de la riviere aux Pekans

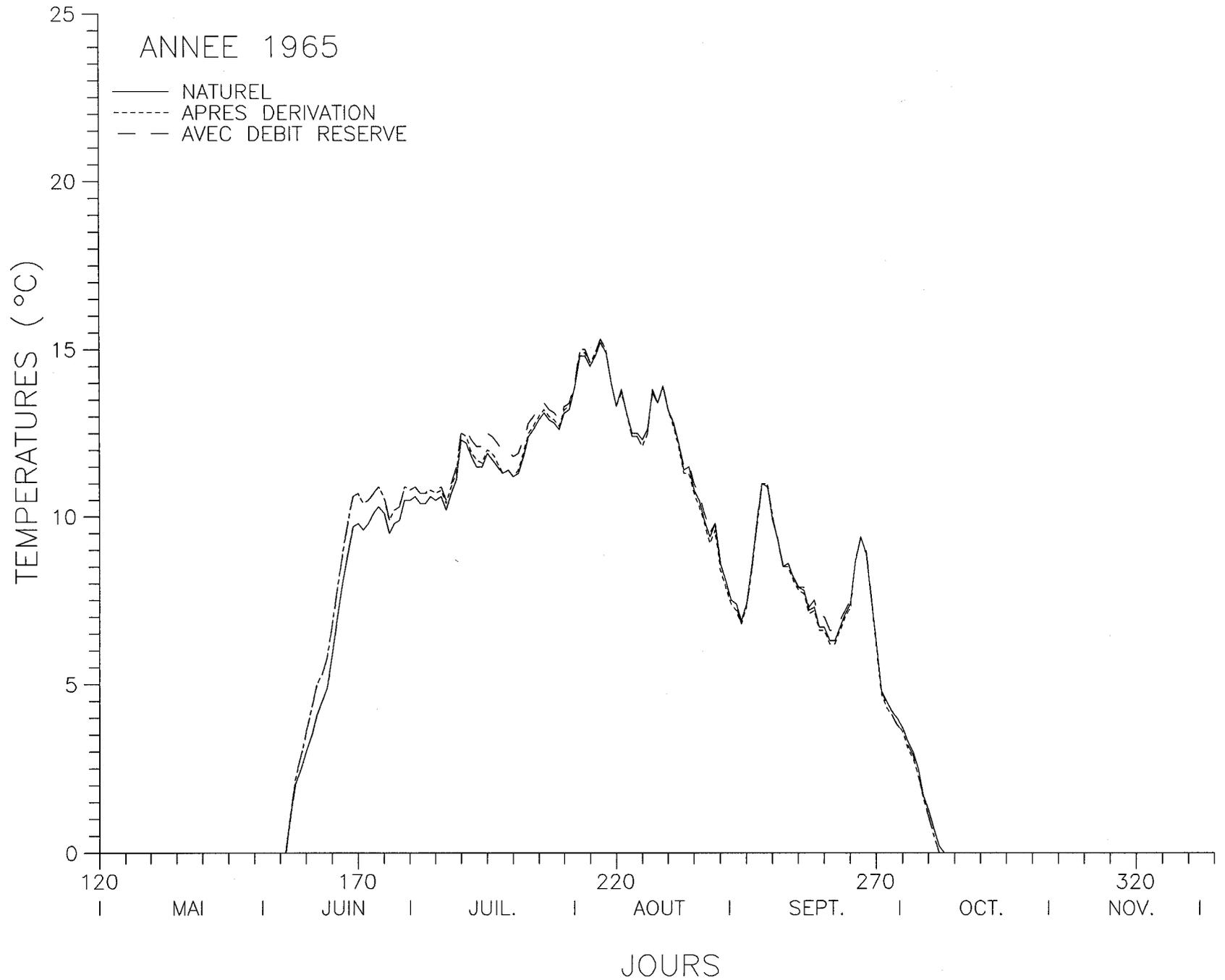


Figure B5 Temperature journaliere de l'eau: Moisie en aval de la riviere aux Pekans

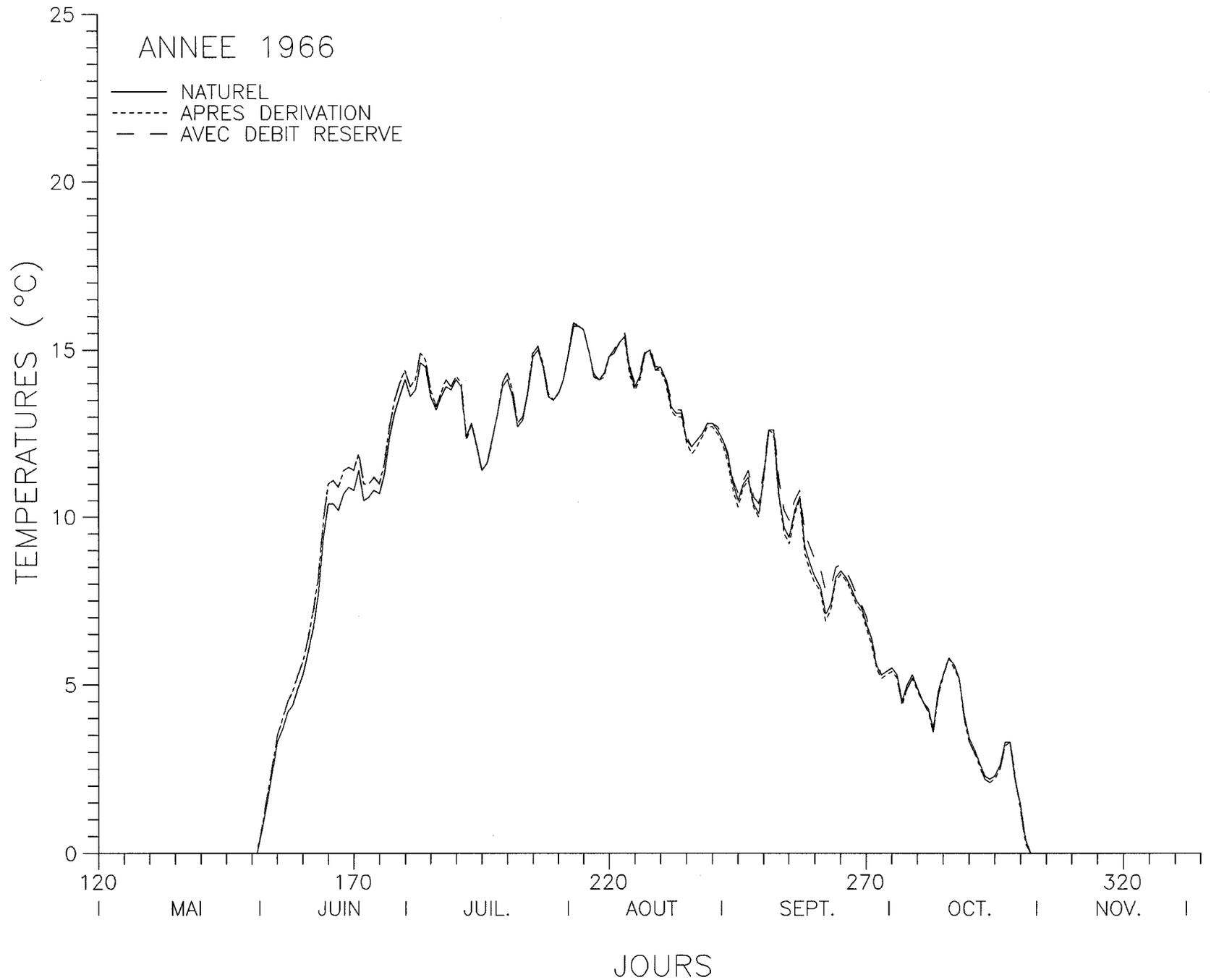


Figure B6 Temperature journaliere de l'eau: Moisie en aval de la riviere aux Pekans

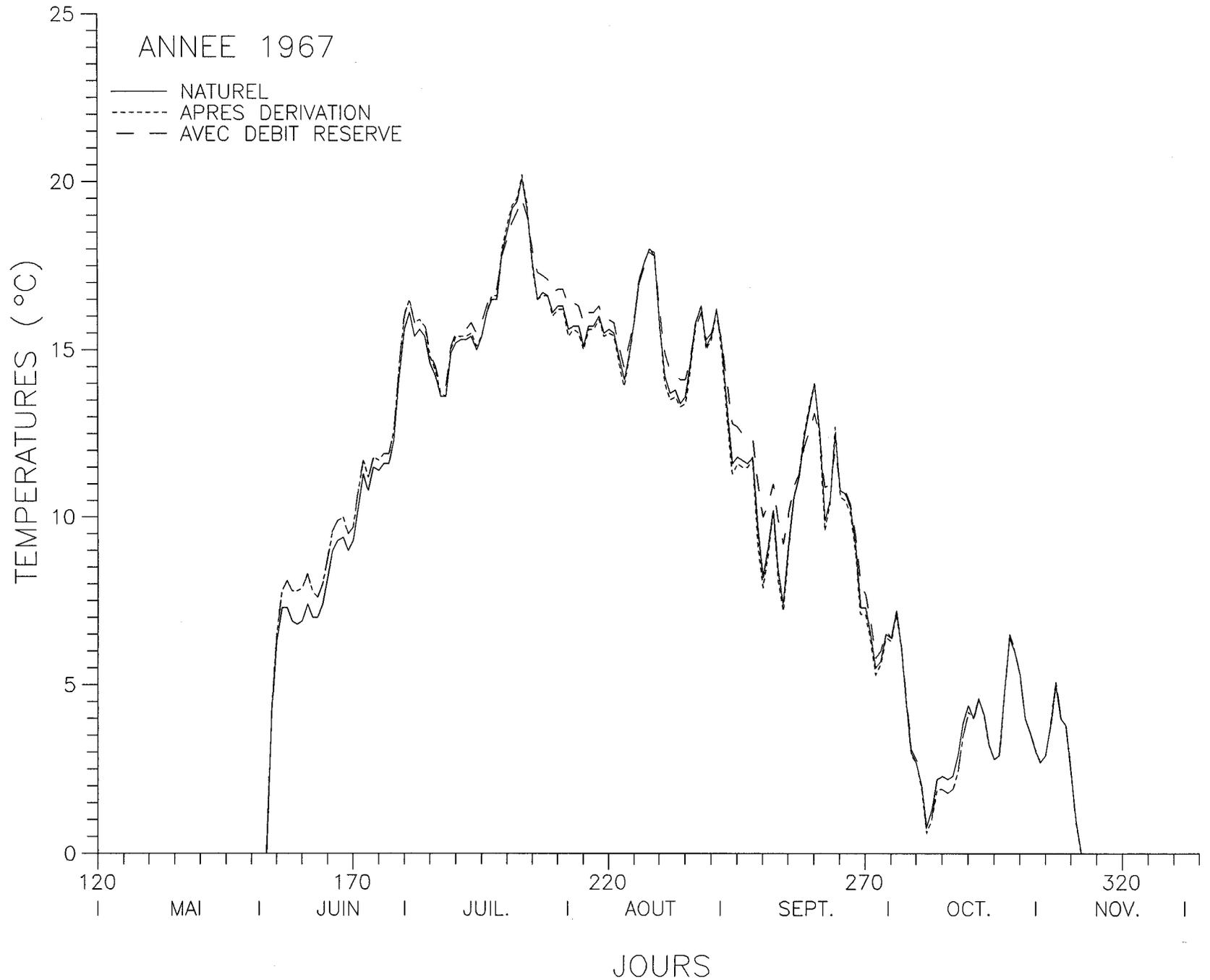


Figure B7 Temperature journaliere de l'eau: Moisie en aval de la riviere aux Pekans

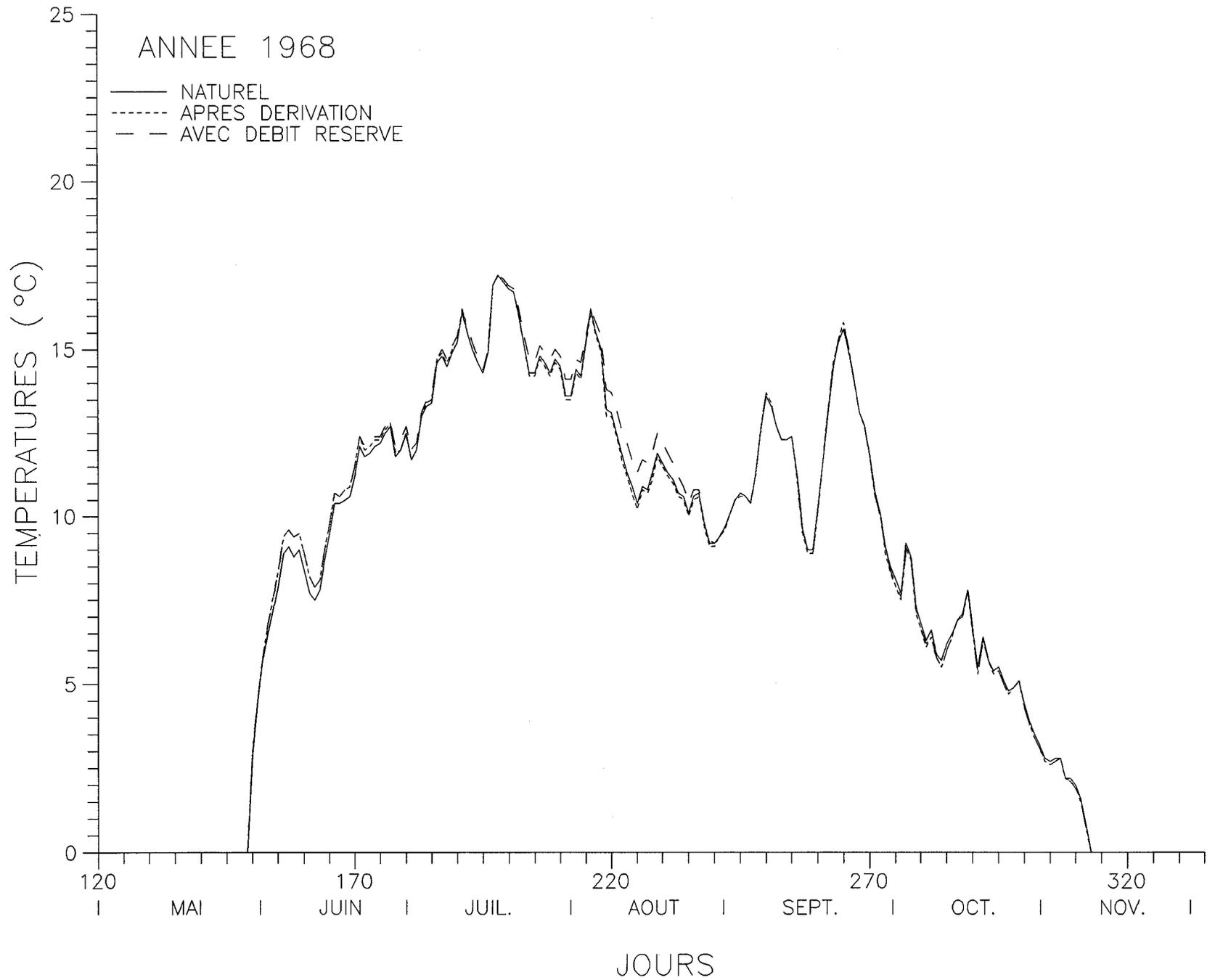


Figure B8 Temperature journaliere de l'eau: Moisie en aval de la riviere aux Pekans

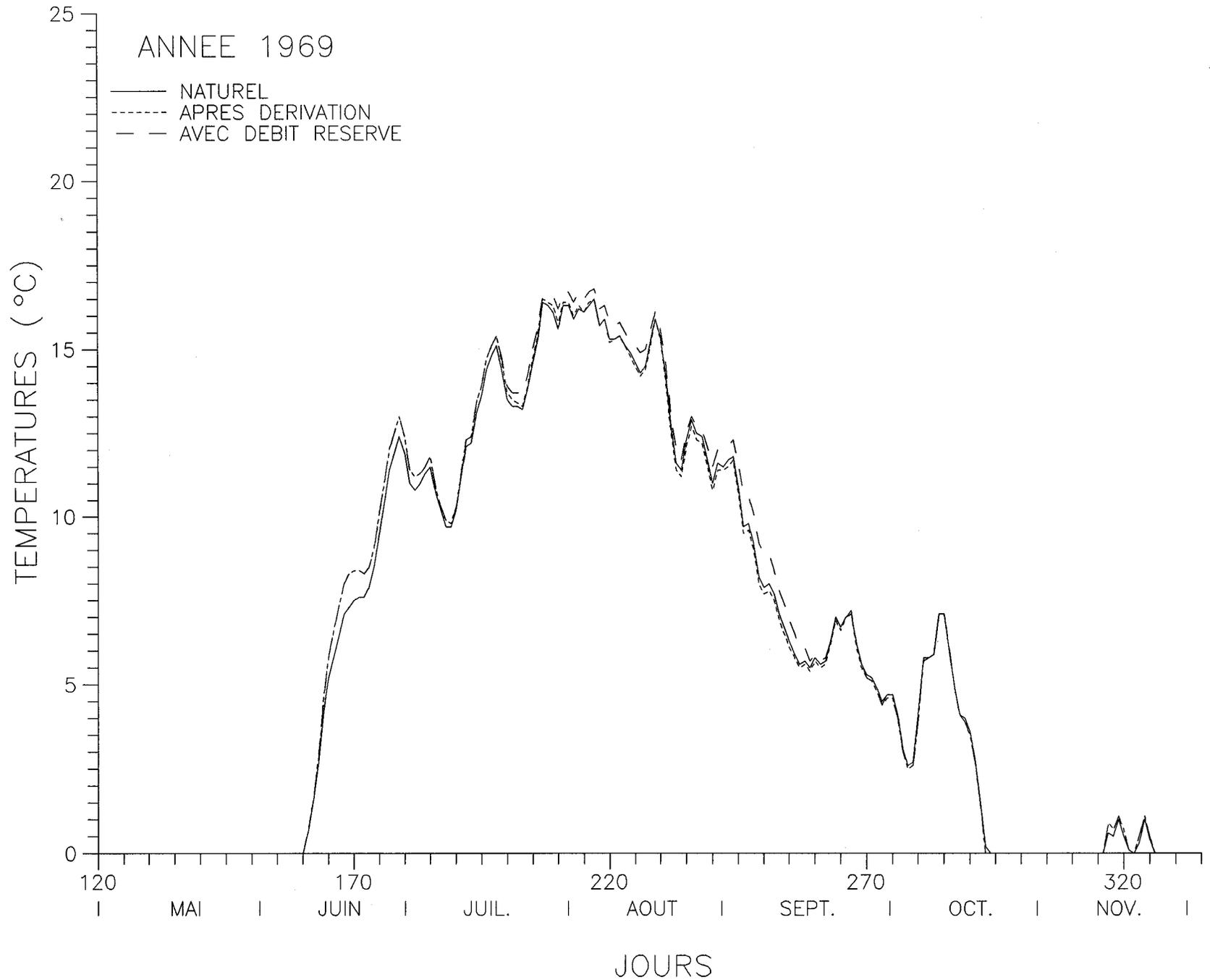


Figure B9 Temperature journaliere de l'eau: Moisie en aval de la riviere aux Pekans

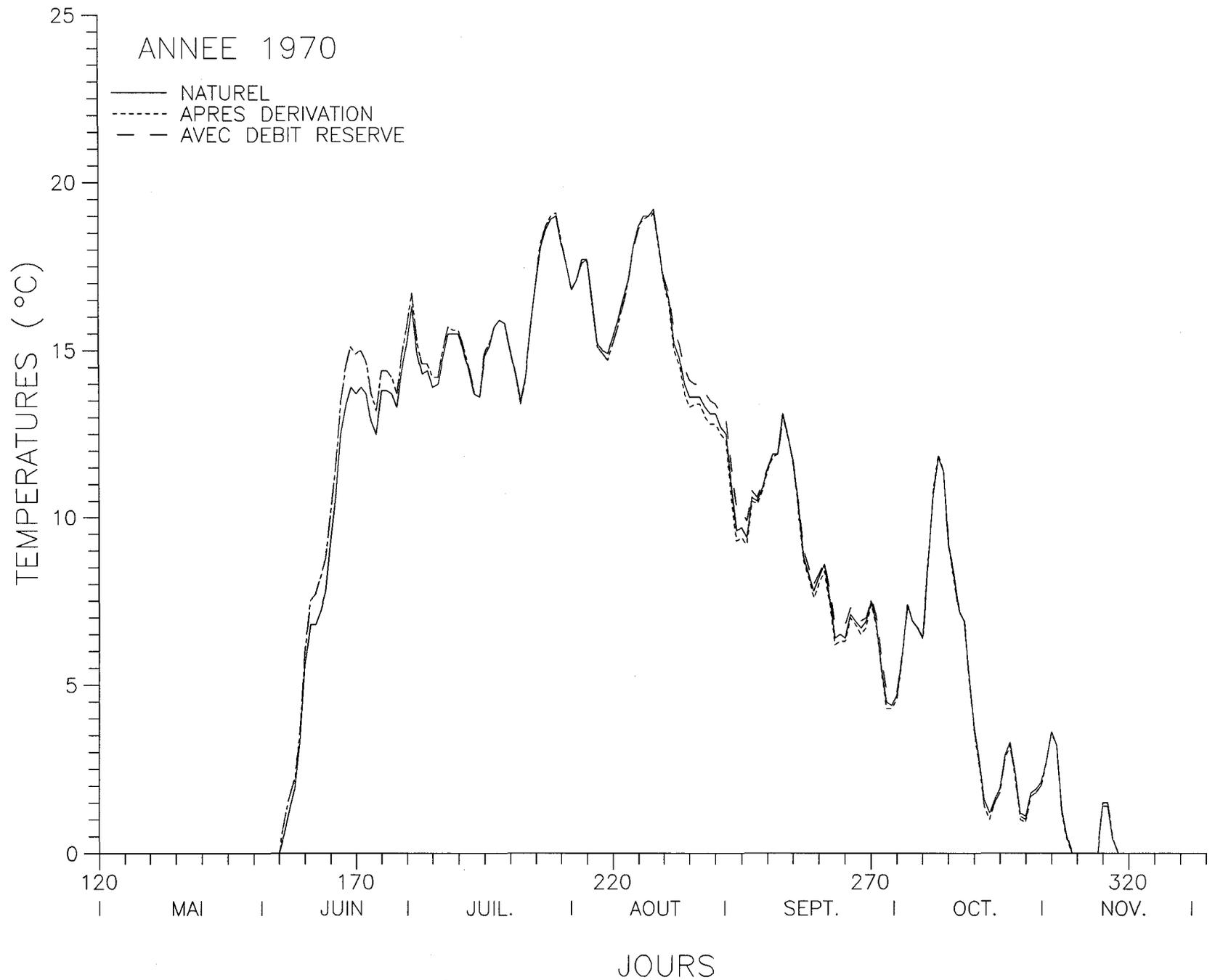


Figure B10 Temperature journaliere de l'eau: Moisie en aval de la riviere aux Pekans

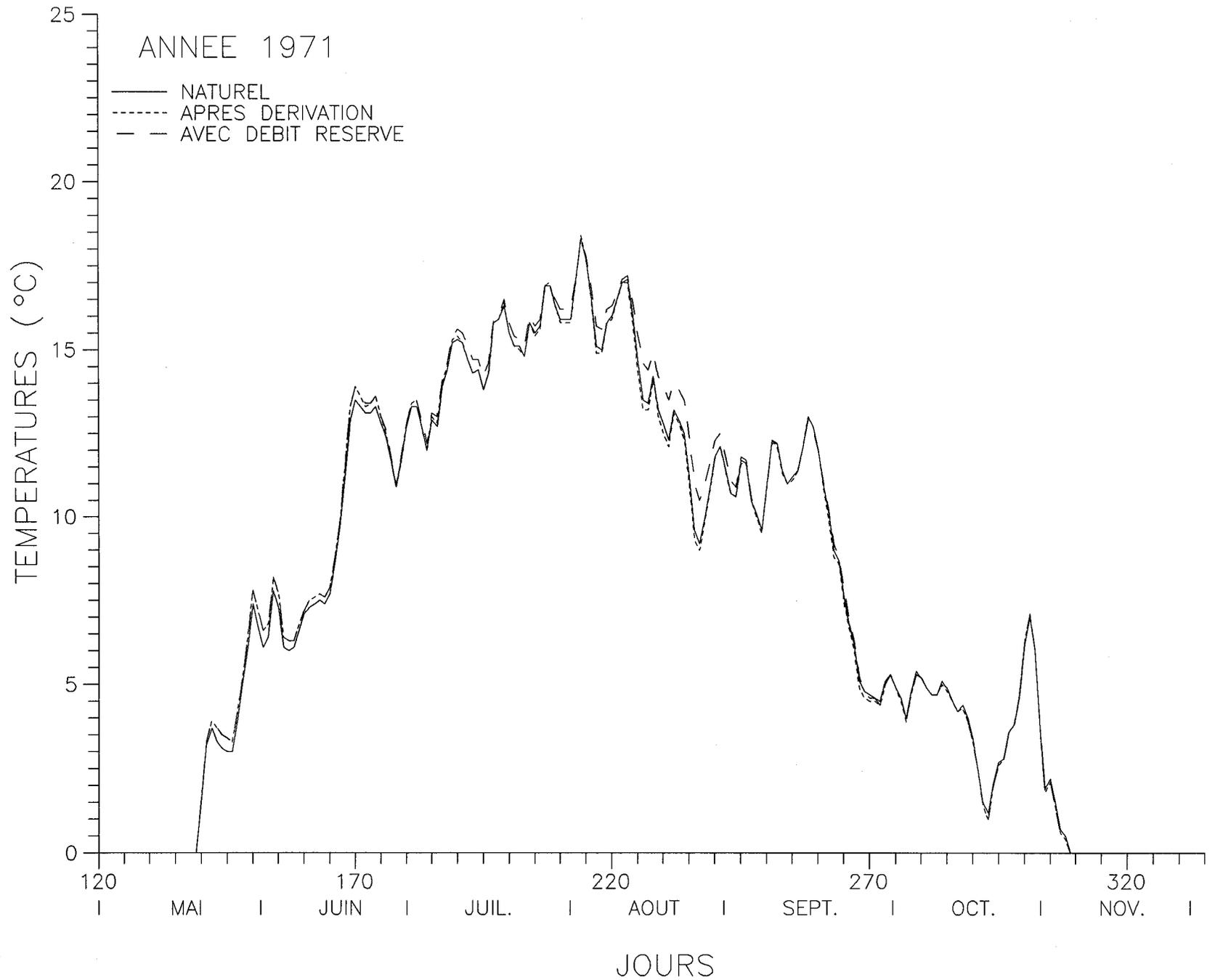


Figure B11 Temperature journaliere de l'eau: Moisie en aval de la riviere aux Pekans

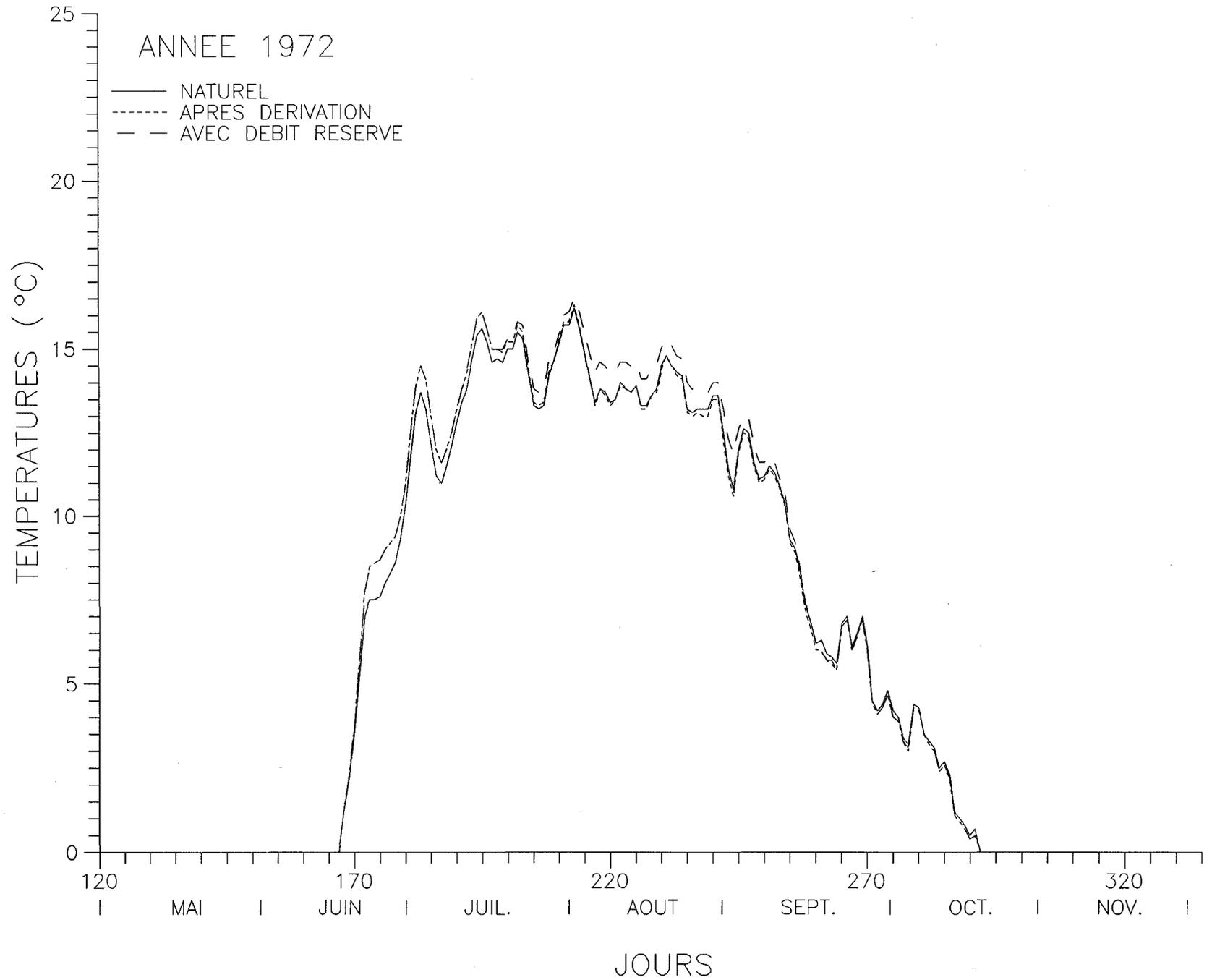


Figure **B12** Temperature journaliere de l'eau: Moisie en aval de la riviere aux Pekans

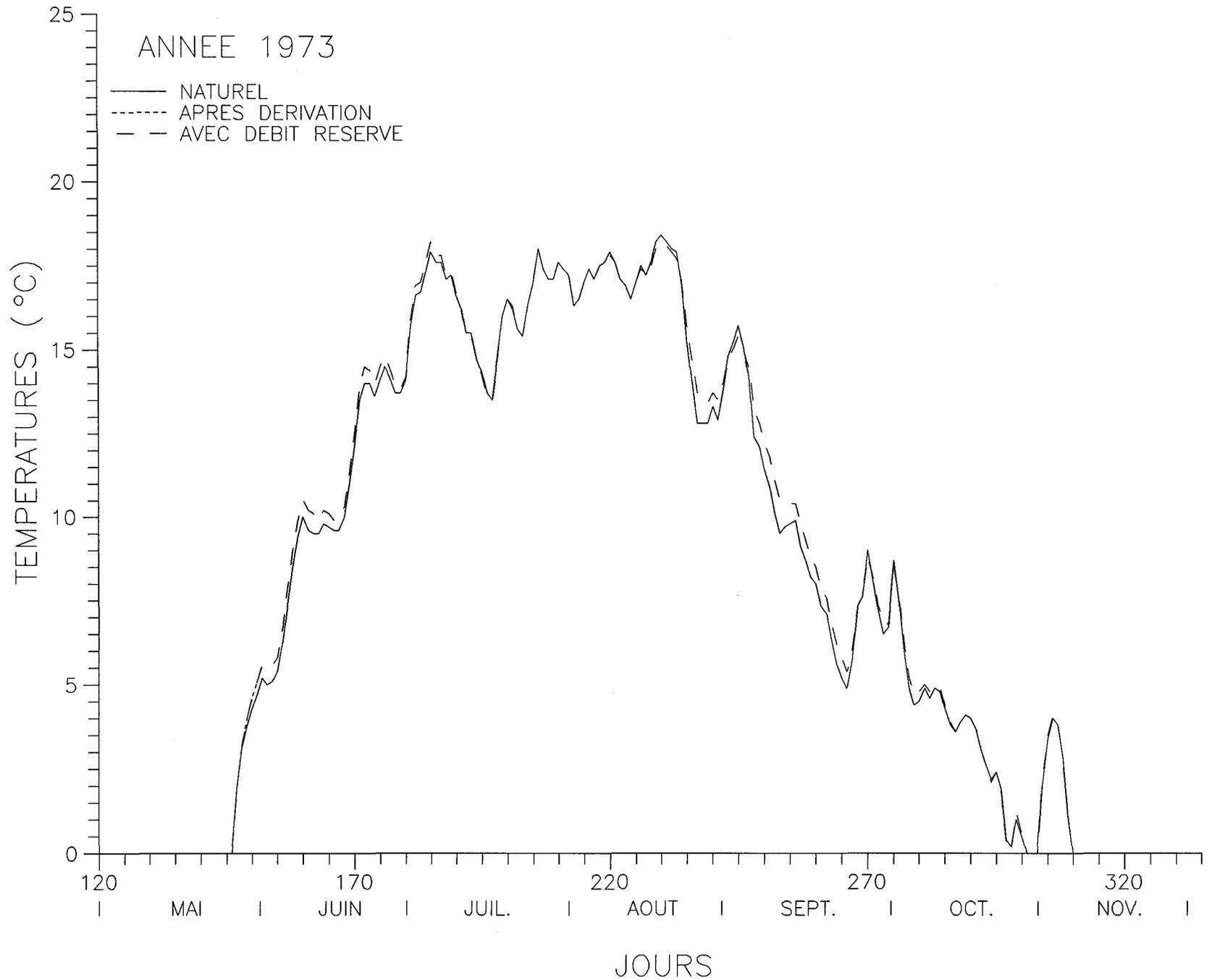


Figure B13 Temperature journaliere de l'eau: Moisie en aval de la riviere aux Pekans

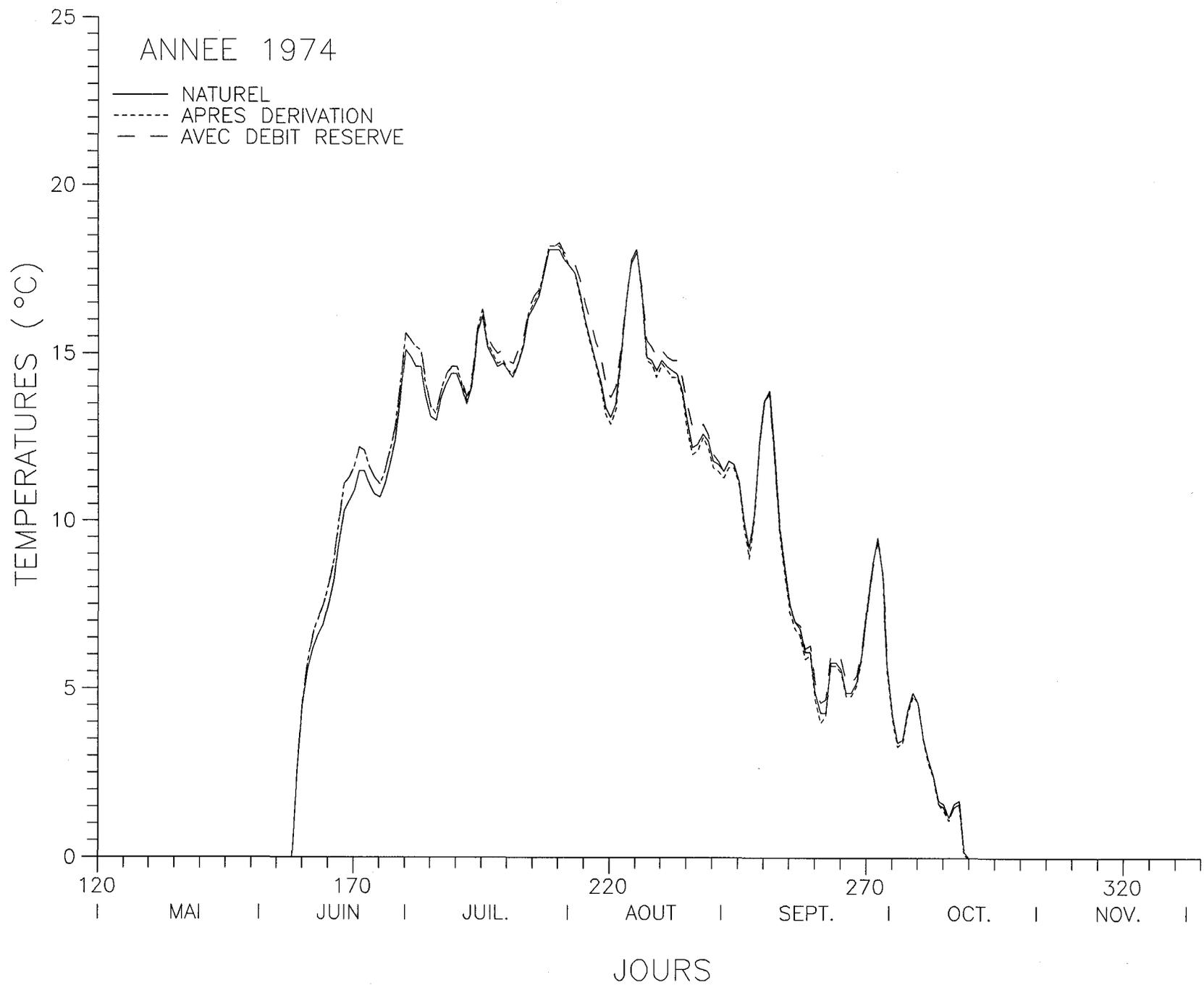


Figure B14 Temperature journaliere de l'eau: Moisie en aval de la riviere aux Pekans

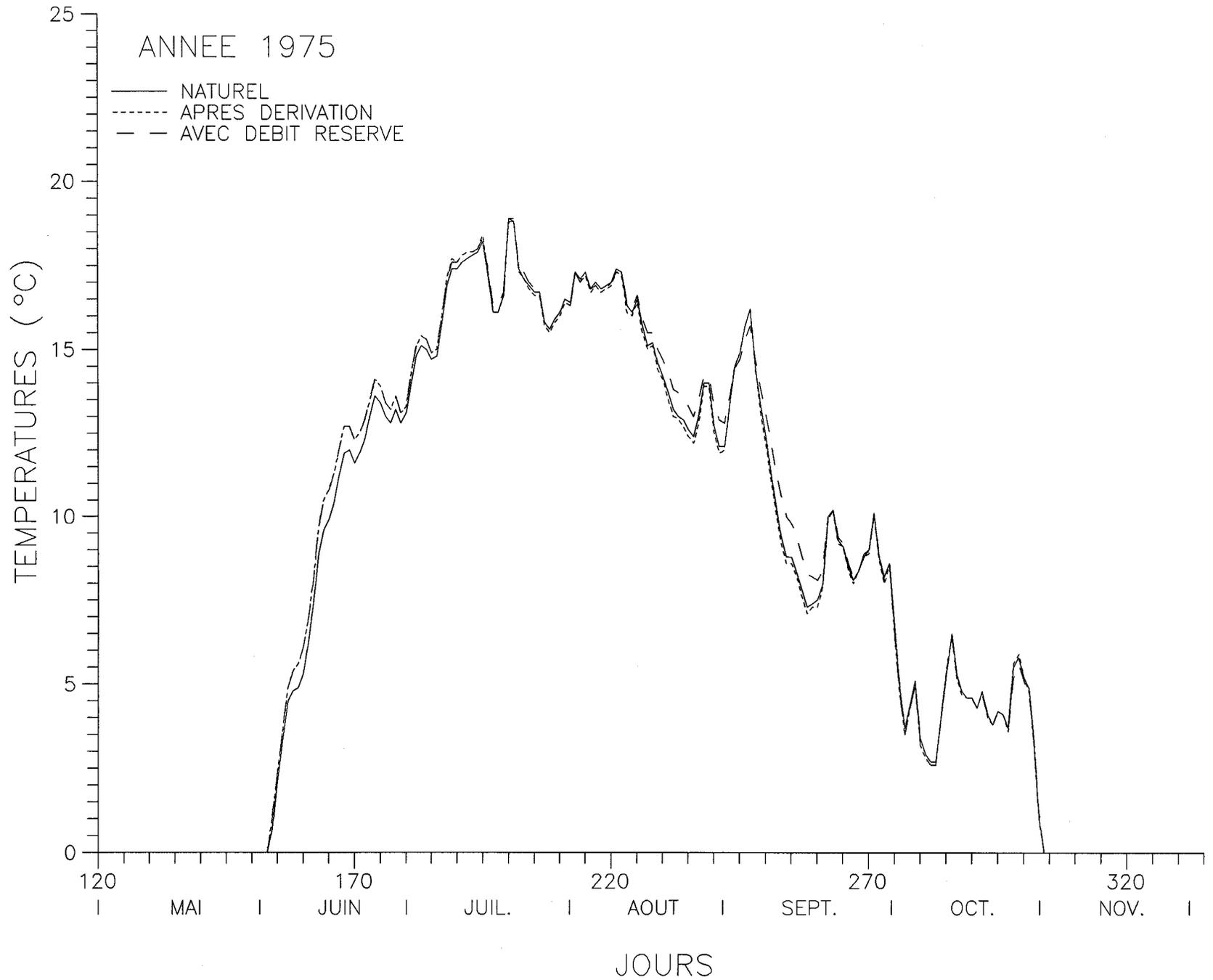


Figure B15 Temperature journaliere de l'eau: Moisie en aval de la riviere aux Pekans

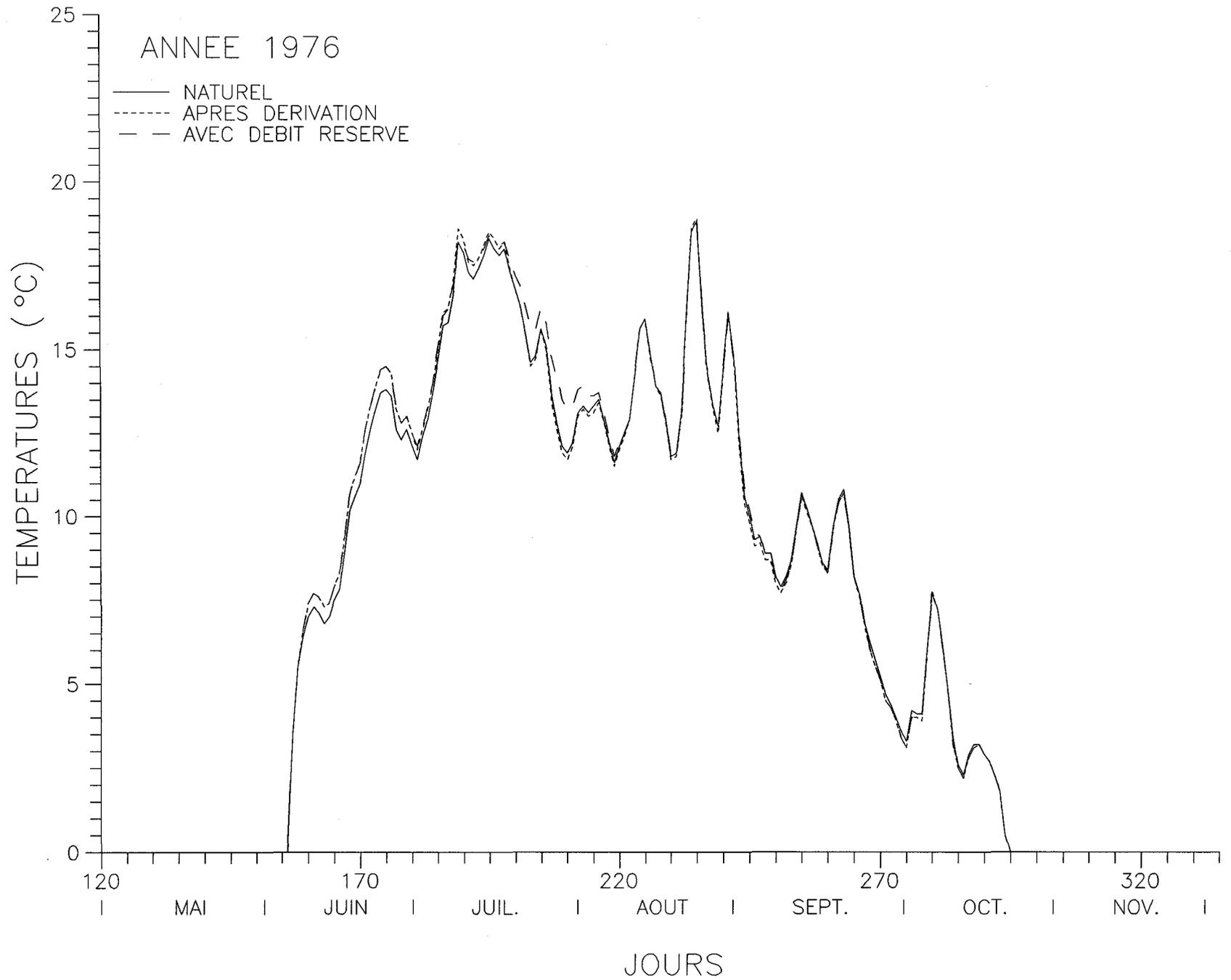


Figure **B16** Temperature journaliere de l'eau: Moisie en aval de la riviere aux Pekans

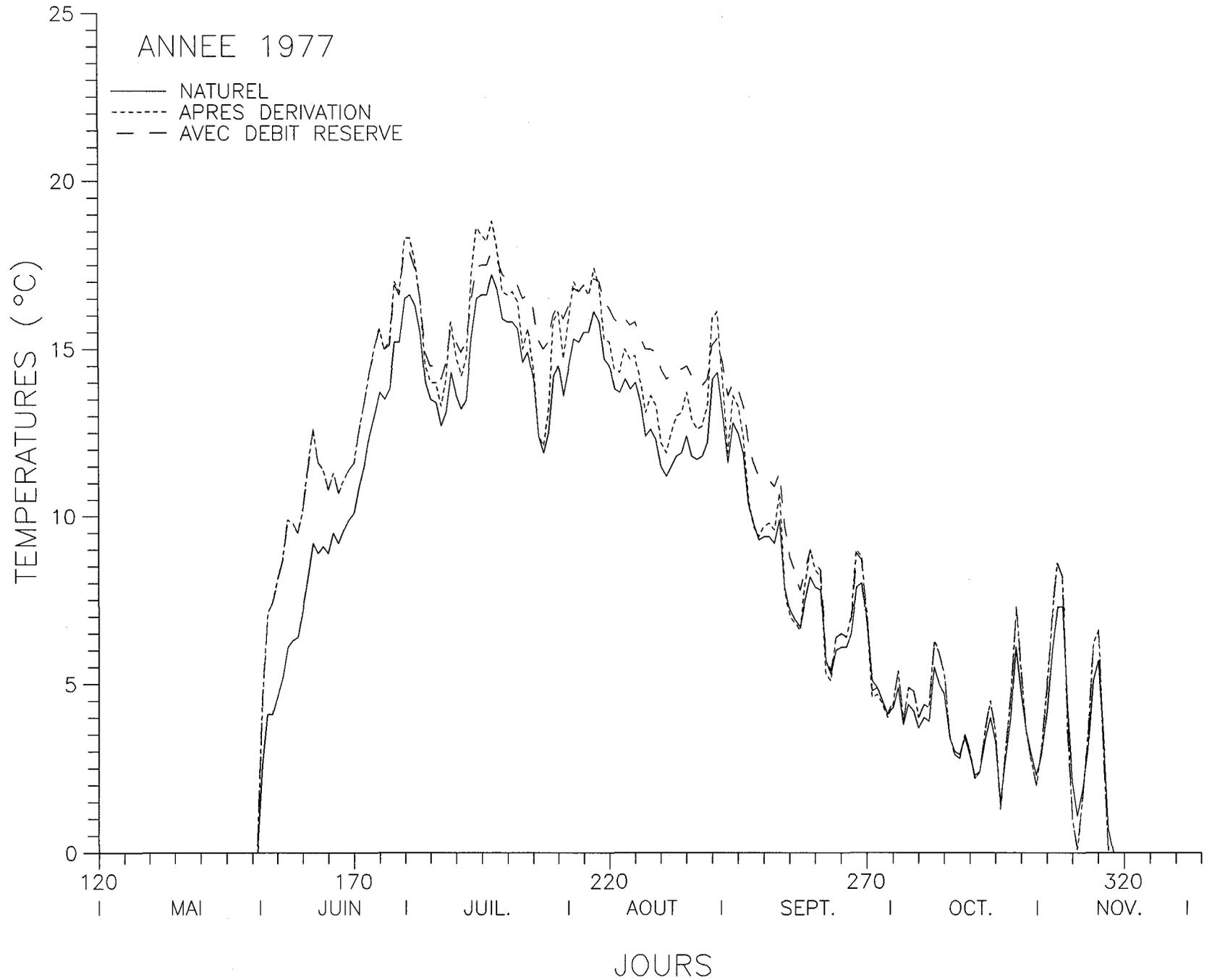


Figure B17 Temperature journaliere de l'eau: Aux Pekans a la station 072302

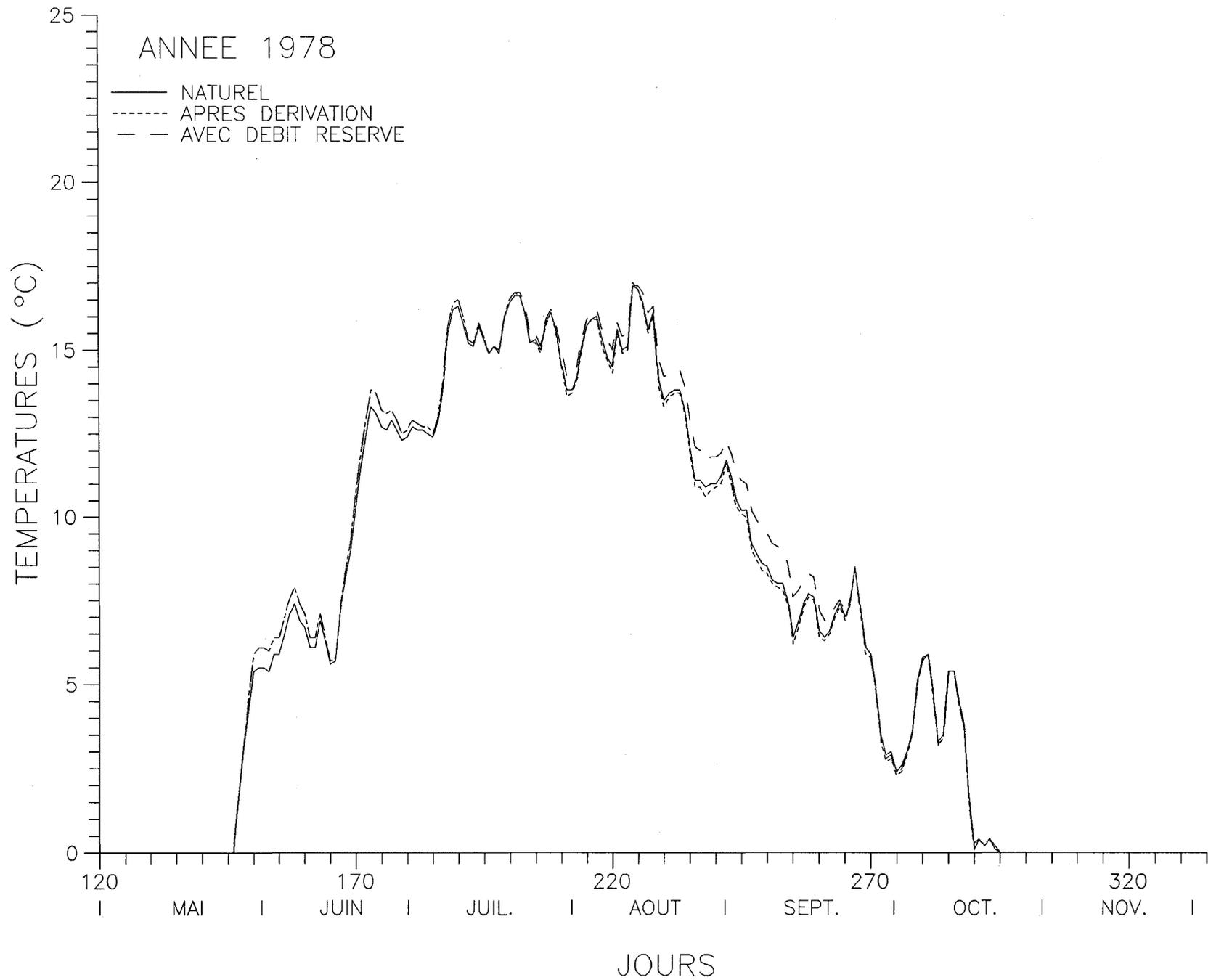


Figure **B18** Temperature journaliere de l'eau: Moisie en aval de la riviere aux Pekans

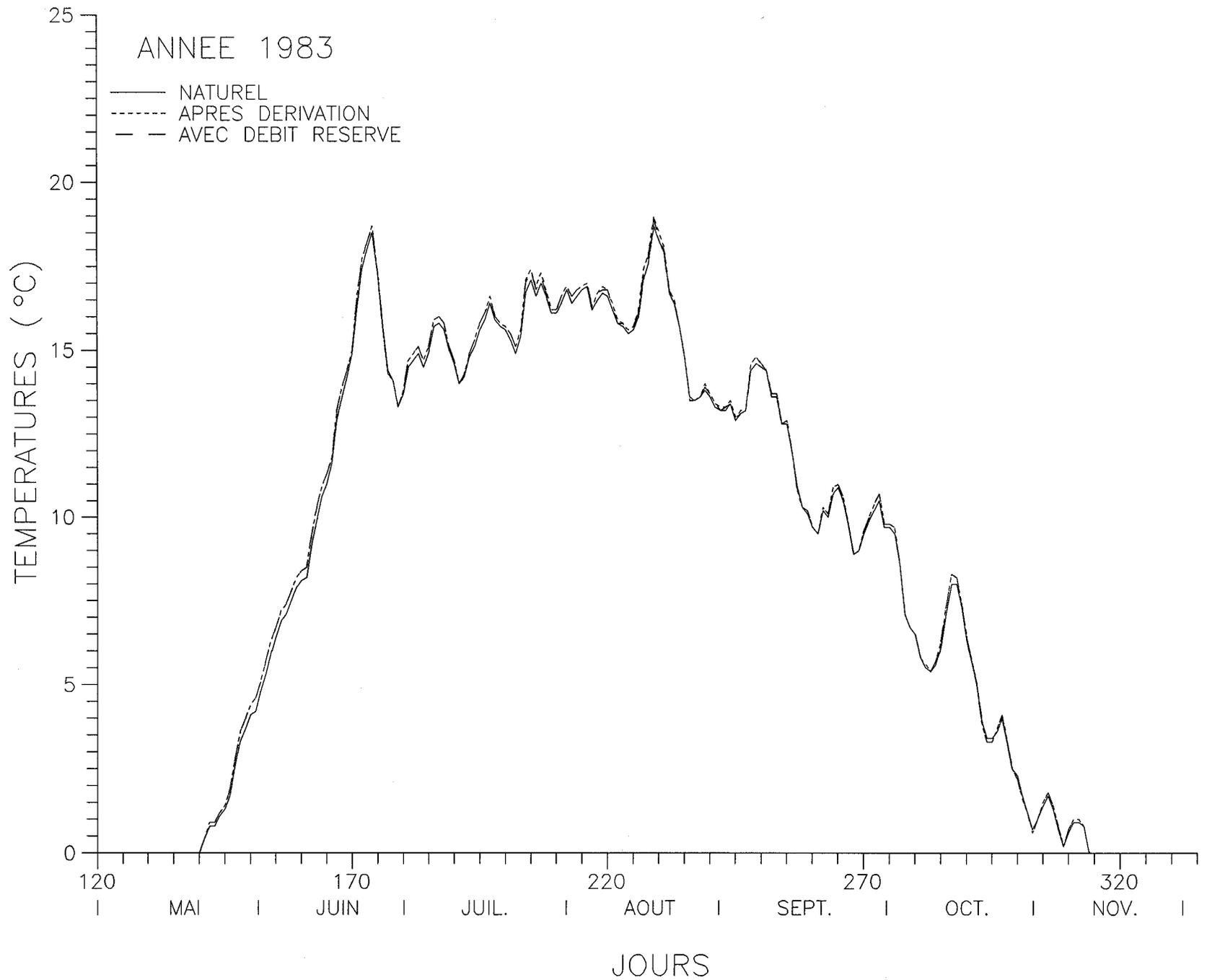


Figure **A23** Temperature journaliere de l'eau: Moisie a la station 072301

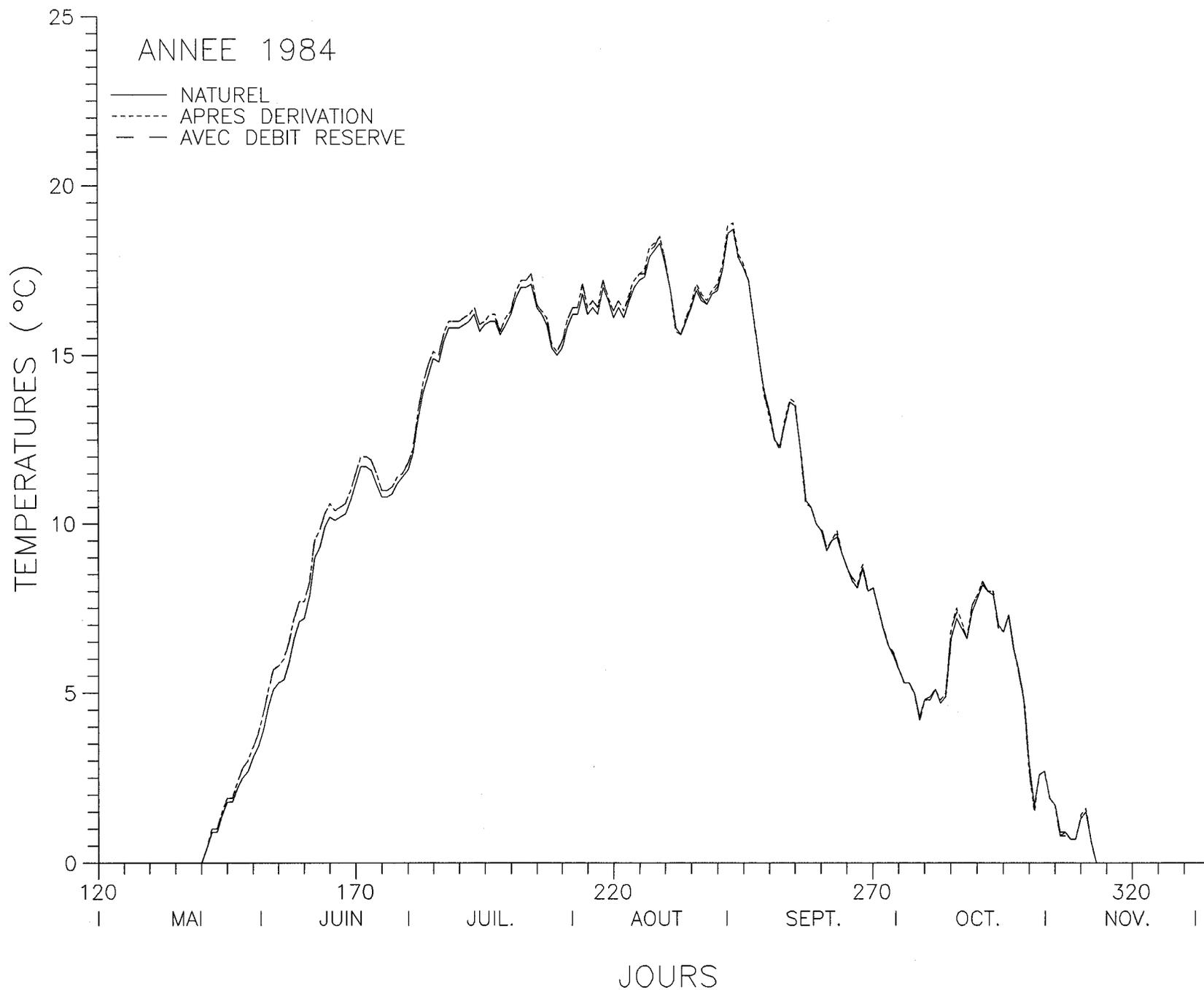


Figure **A24** Temperature journaliere de l'eau: Moisie a la station 072301



Figure B19 Temperature journaliere de l'eau: Moisie en aval de la riviere aux Pekans

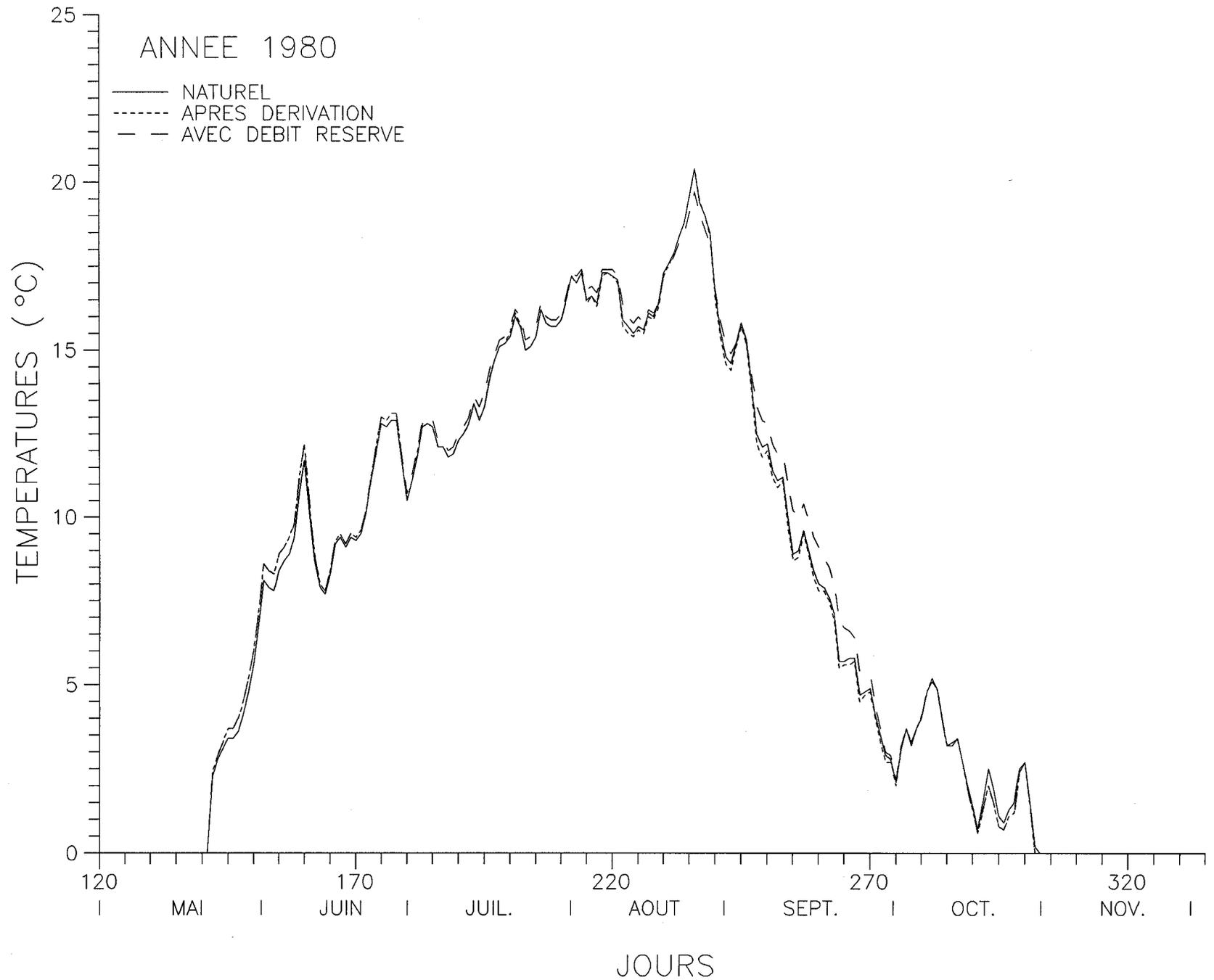


Figure B20 Temperature journaliere de l'eau: Moisie en aval de la riviere aux Pekans

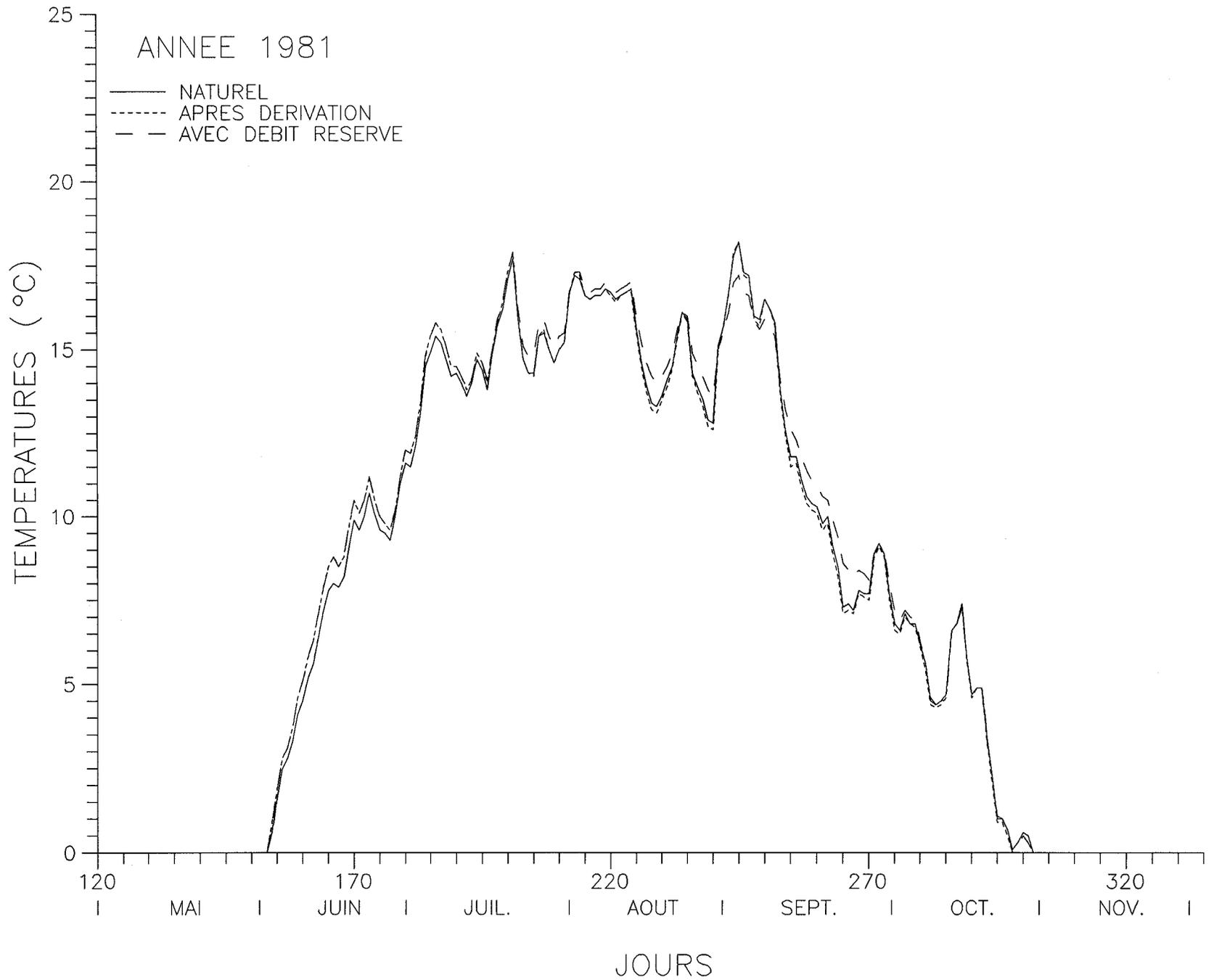


Figure B21 Temperature journalière de l'eau: Moisie en aval de la rivière aux Pekans

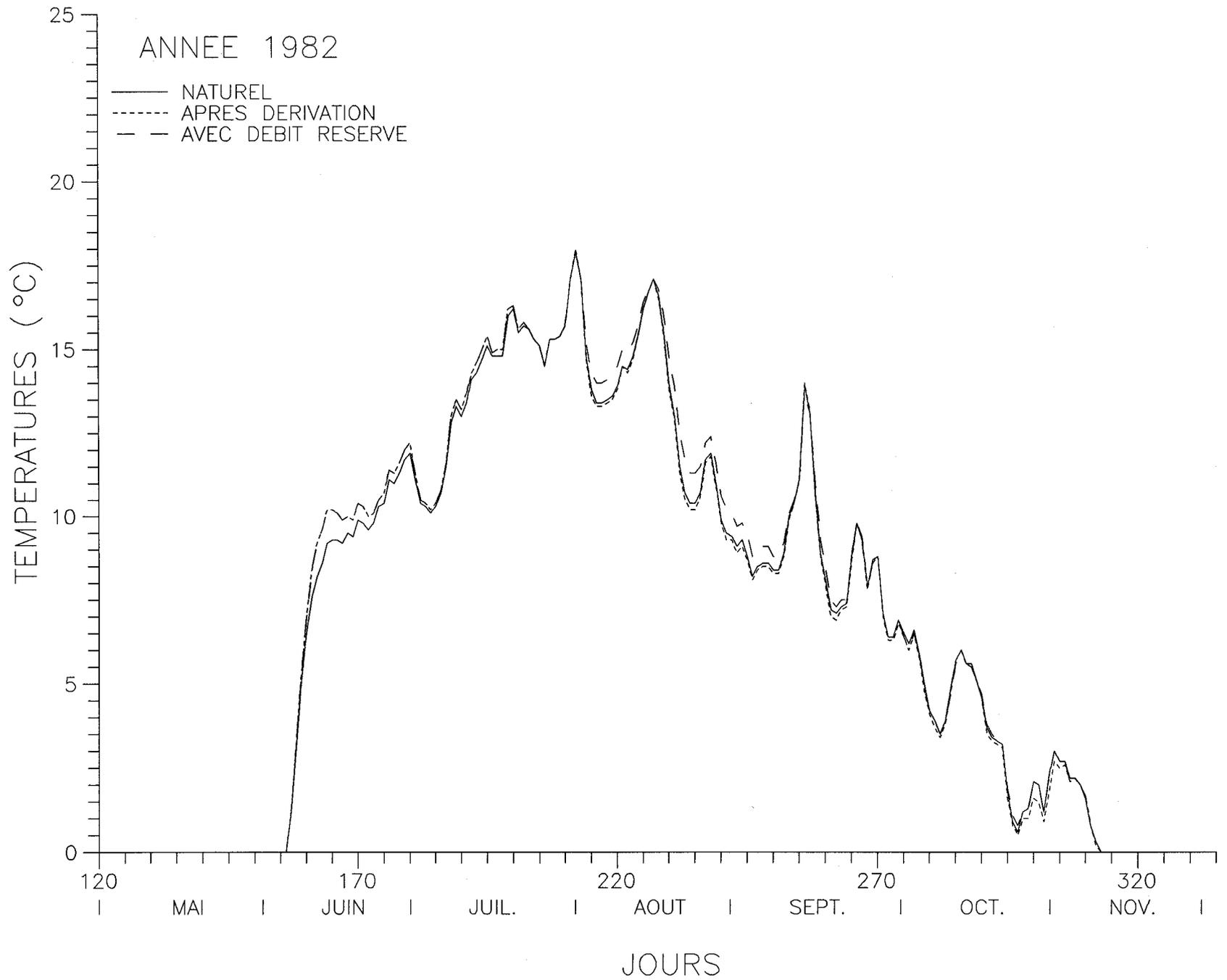


Figure B22 Temperature journaliere de l'eau: Moisie en aval de la riviere aux Pekans



Figure **B23** Temperature journaliere de l'eau: Moisie en aval de la riviere aux Pekans

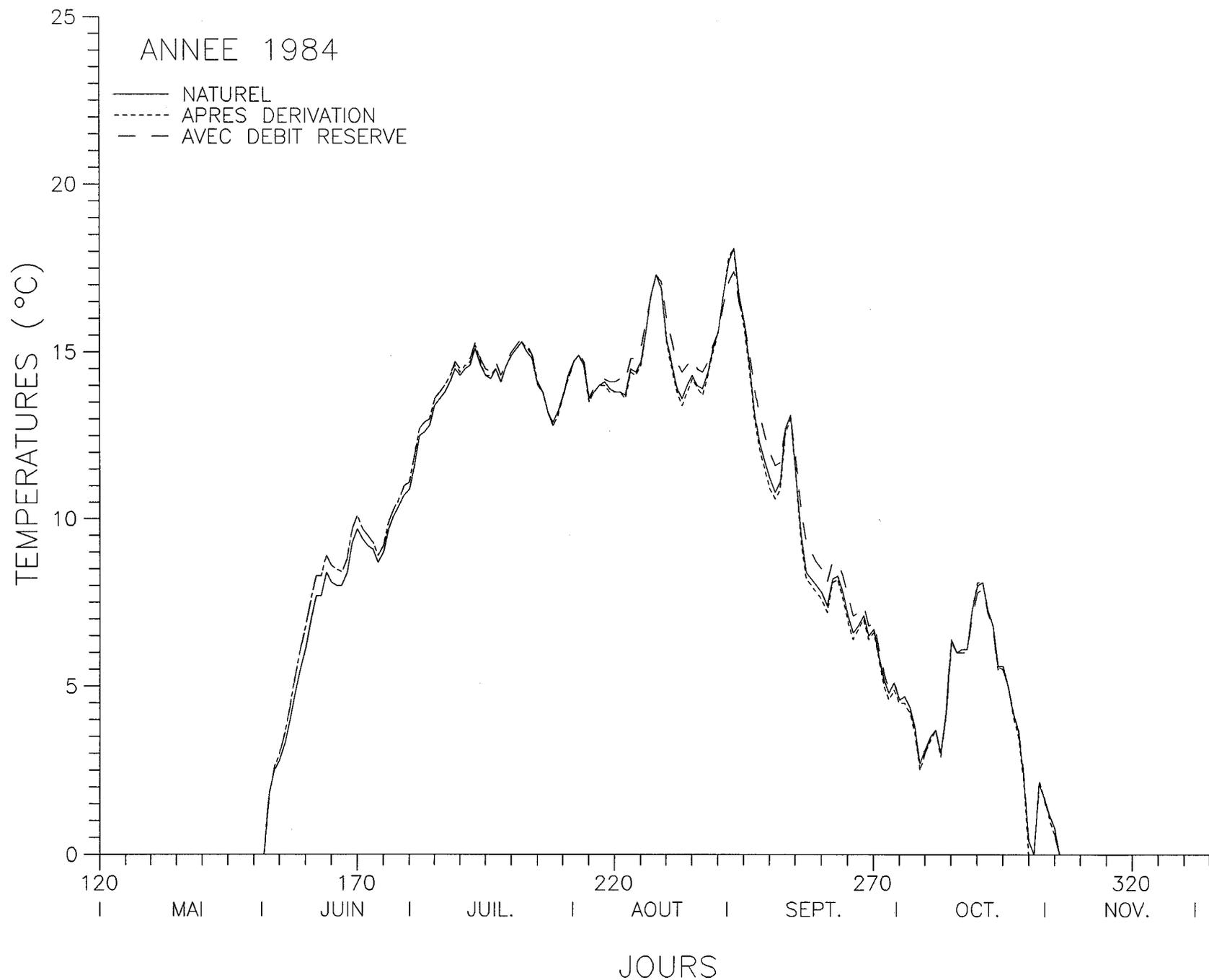


Figure **B24** Temperature journalière de l'eau: Moisie en aval de la rivière aux Pekans

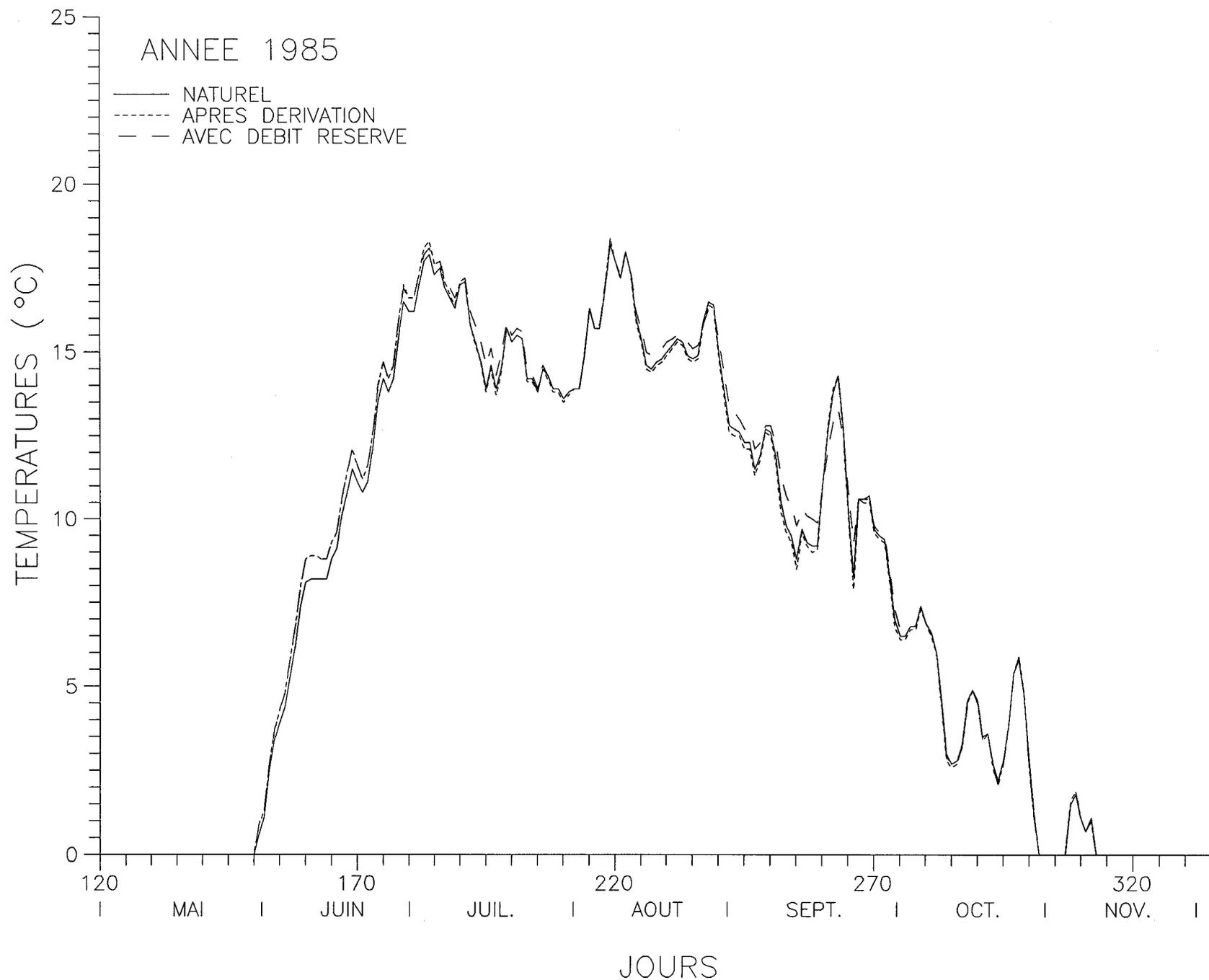


Figure B25 Temperature journaliere de l'eau: Moisie en aval de la riviere aux Pekans

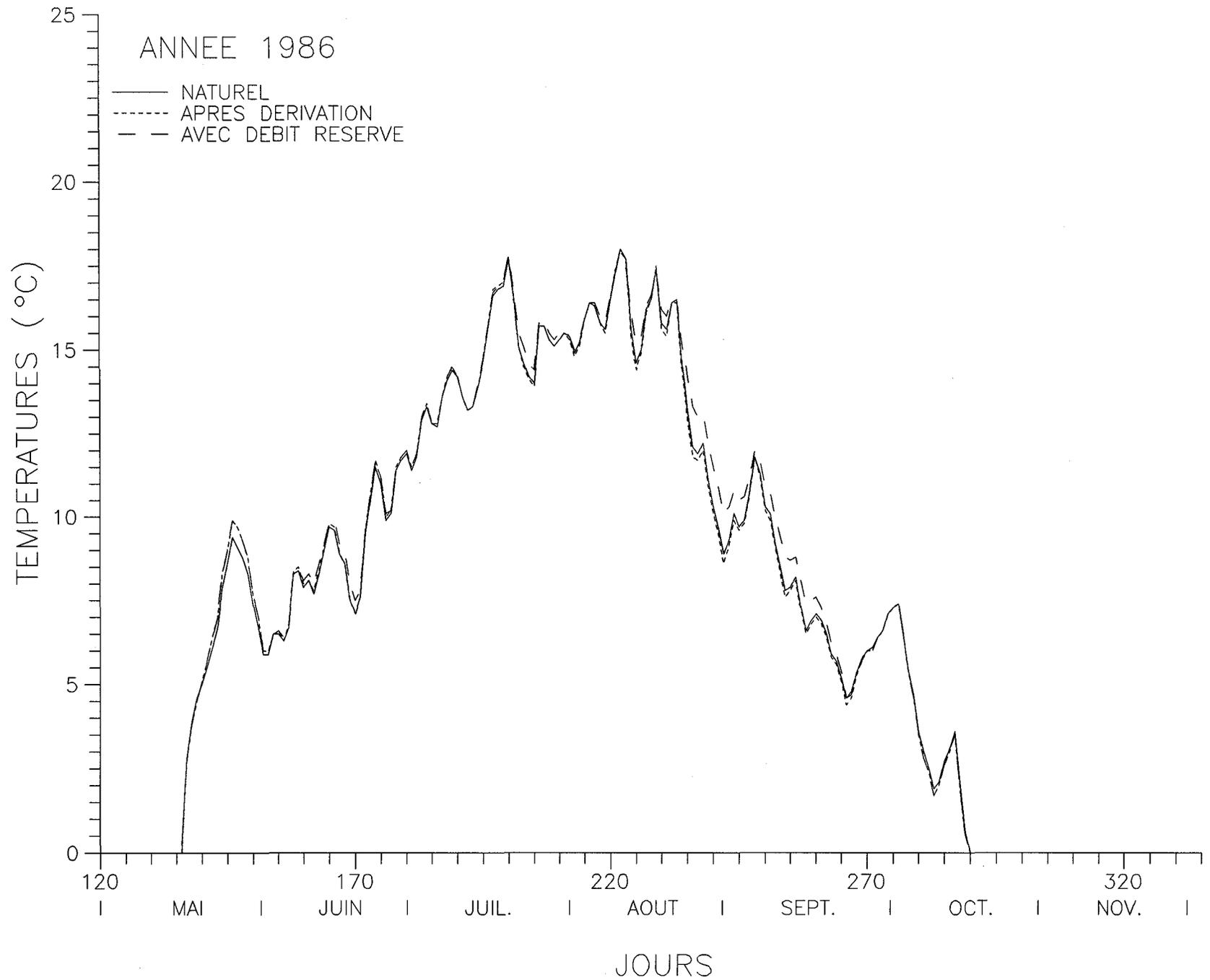


Figure B26 Temperature journaliere de l'eau: Moisie en aval de la riviere aux Pekans



Figure **B27** Temperature journaliere de l'eau: Moisie en aval de la riviere aux Pekans

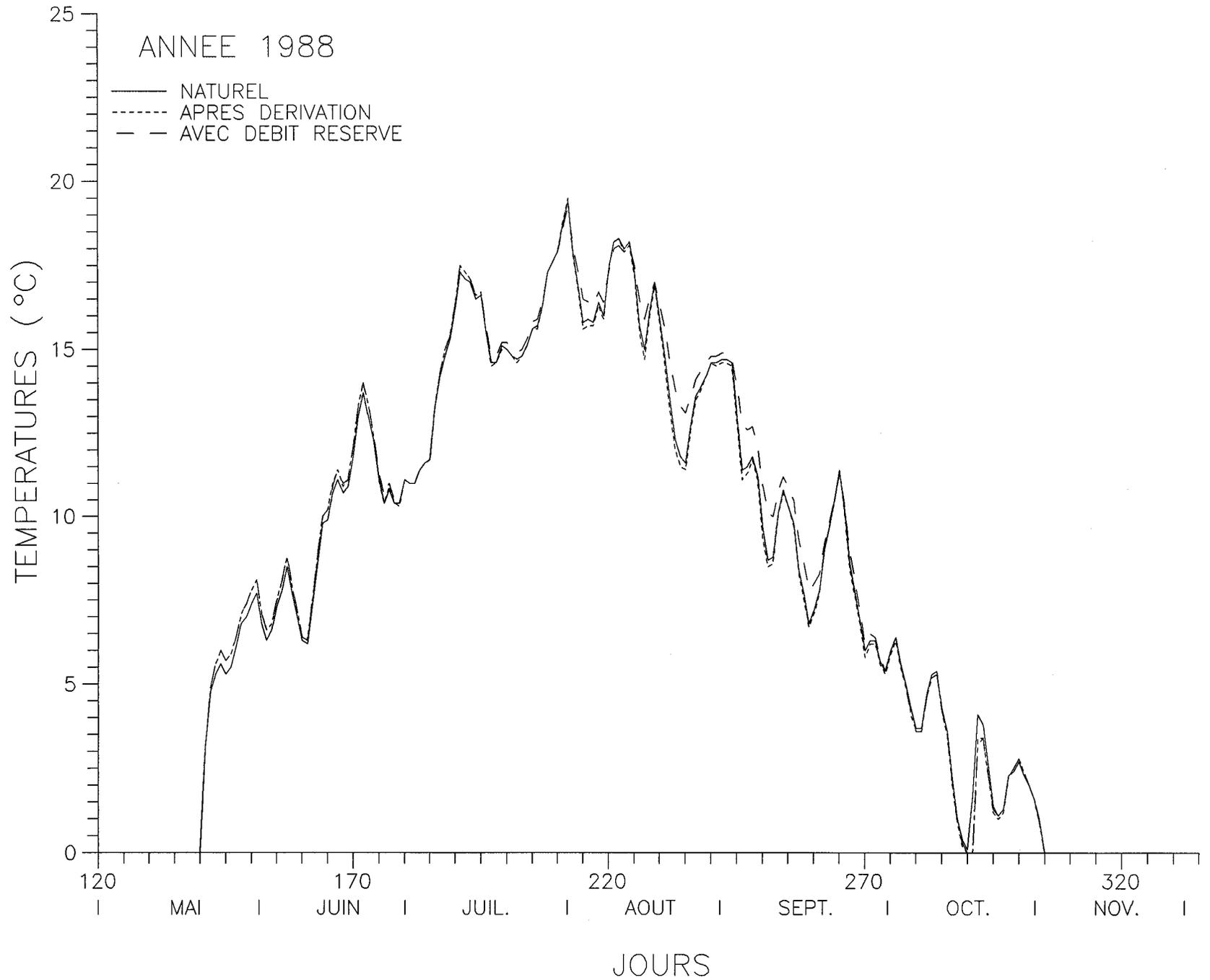


Figure B28 Temperature journaliere de l'eau: Moisie en aval de la riviere aux Pekans

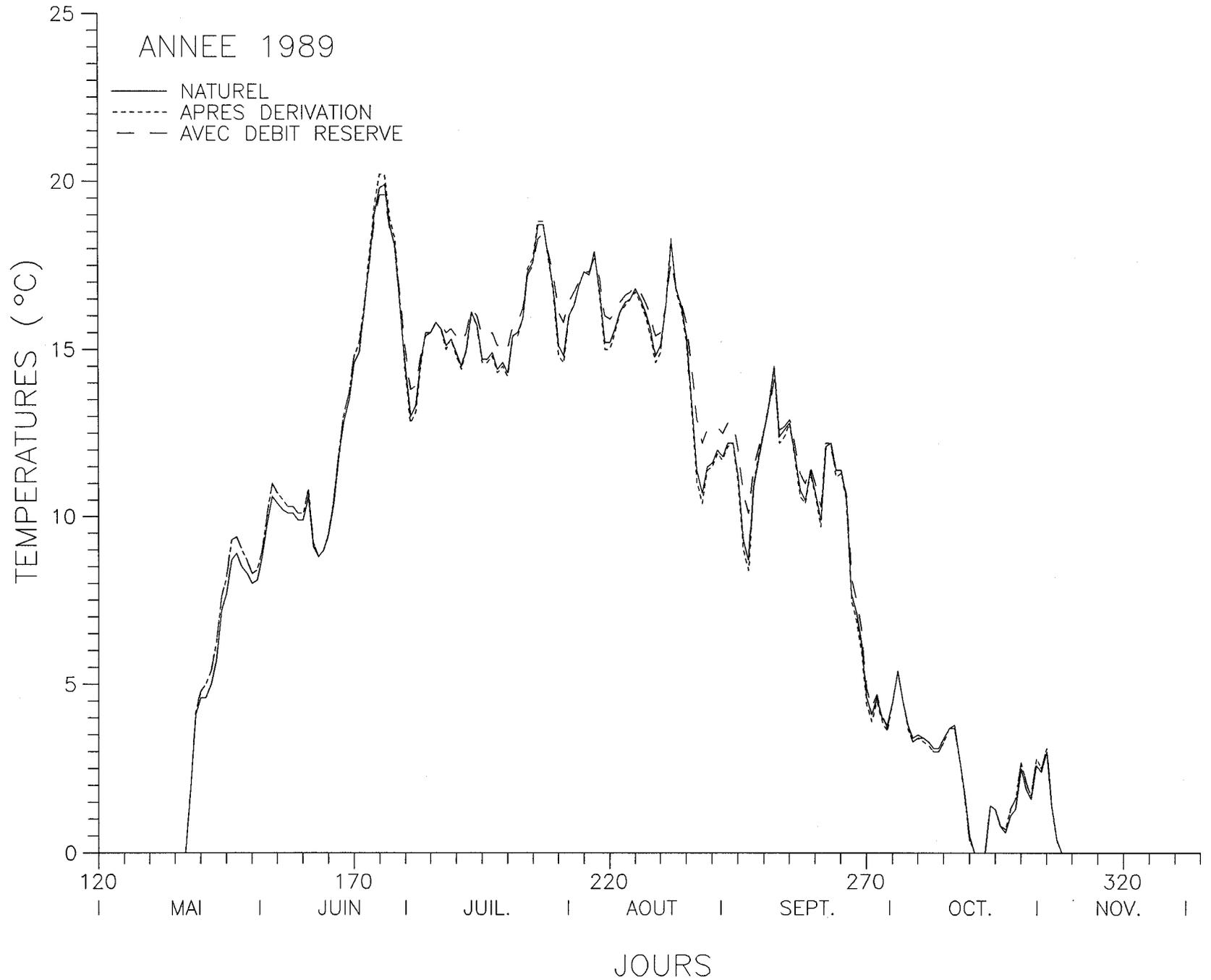


Figure B29 Temperature journaliere de l'eau: Moisie en aval de la riviere aux Pekans

ANNEXE C

GRAPHIQUES DES TEMPÉRATURES DE L'EAU

JOURNALIERES AU SITE:

AUX PÉKANS A LA STATION 072302

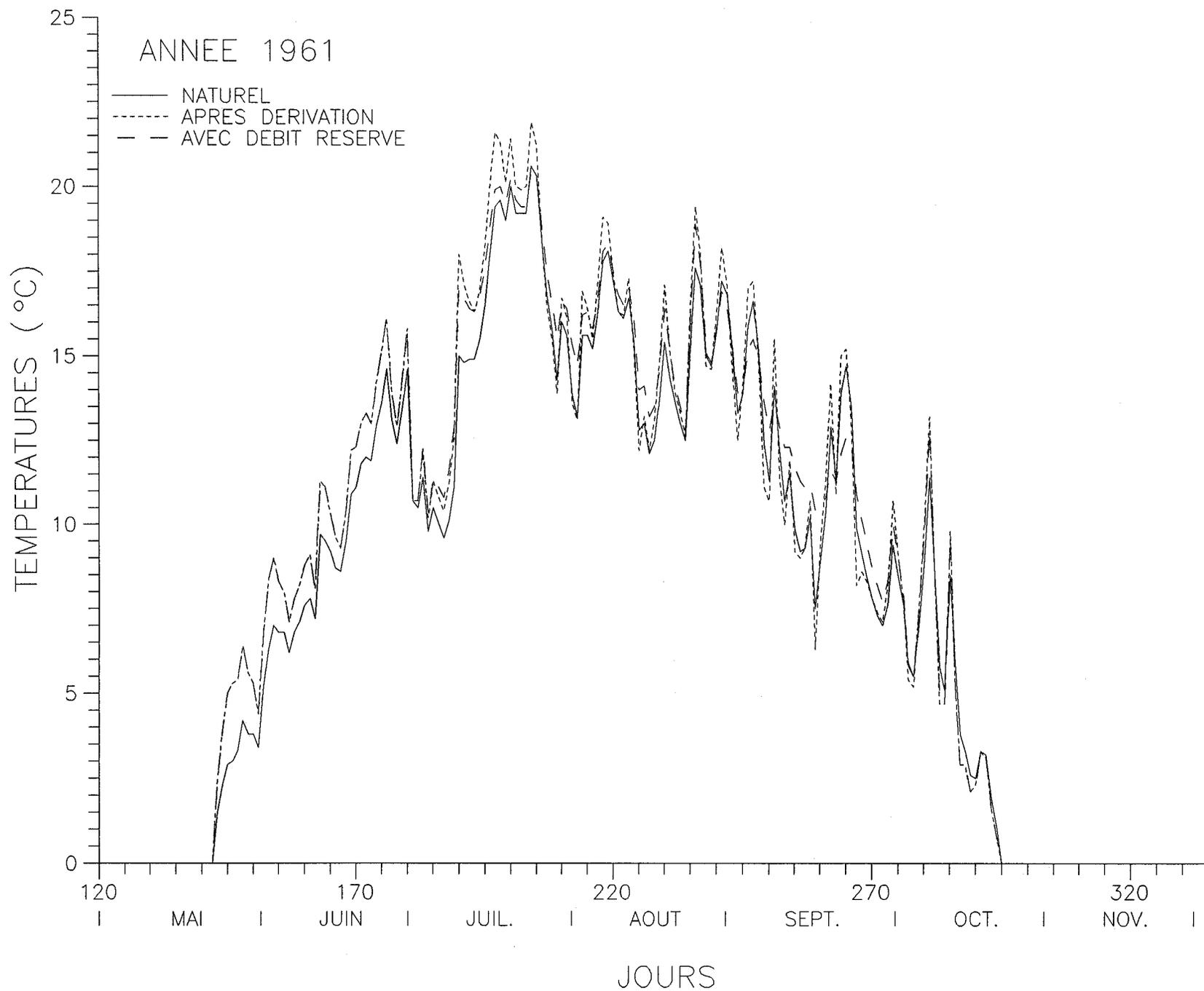


Figure C1 Temperature journaliere de l'eau: Aux Pekans a la station 072302

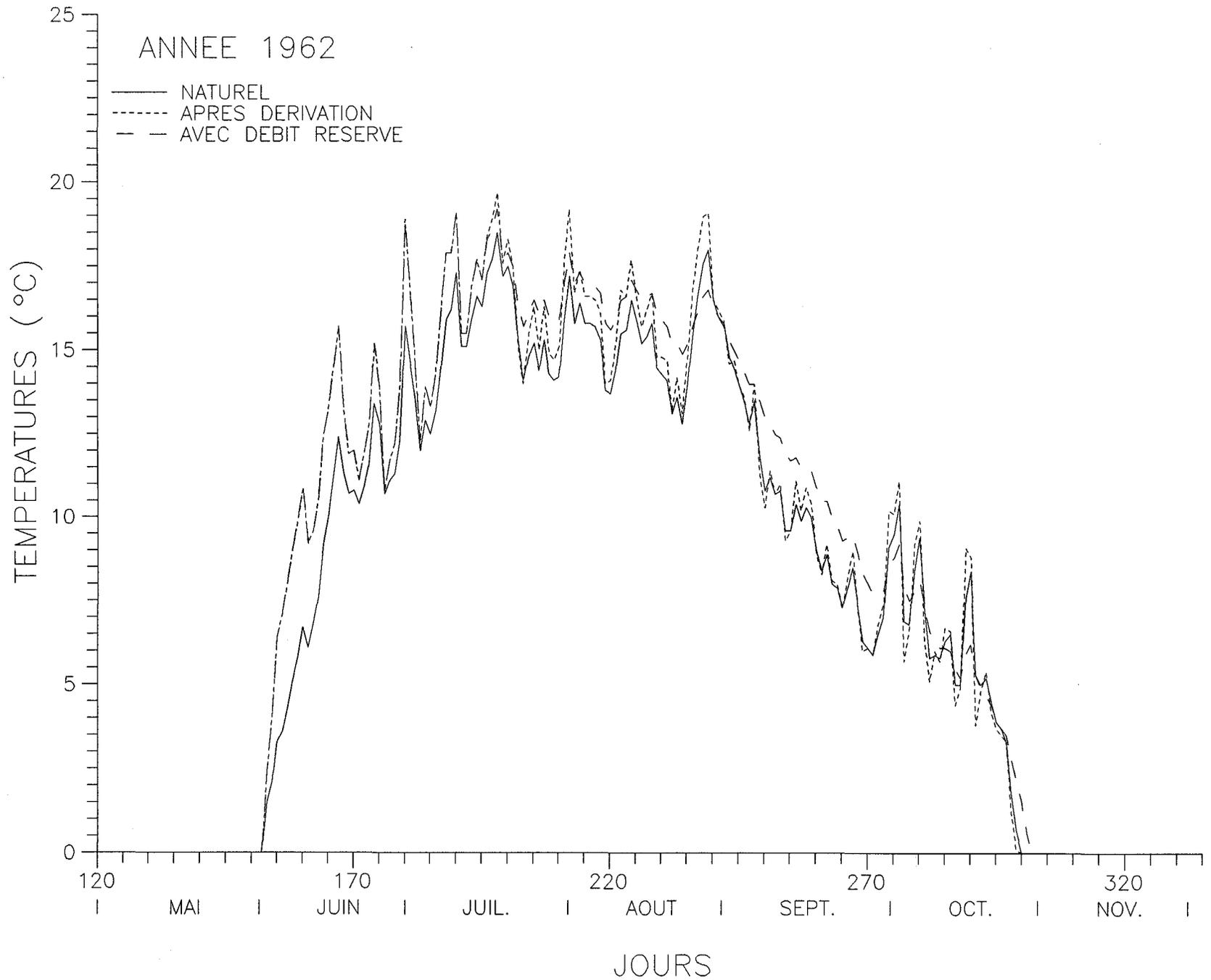


Figure C2 Temperature journaliere de l'eau: Aux Pekans a la station 072302

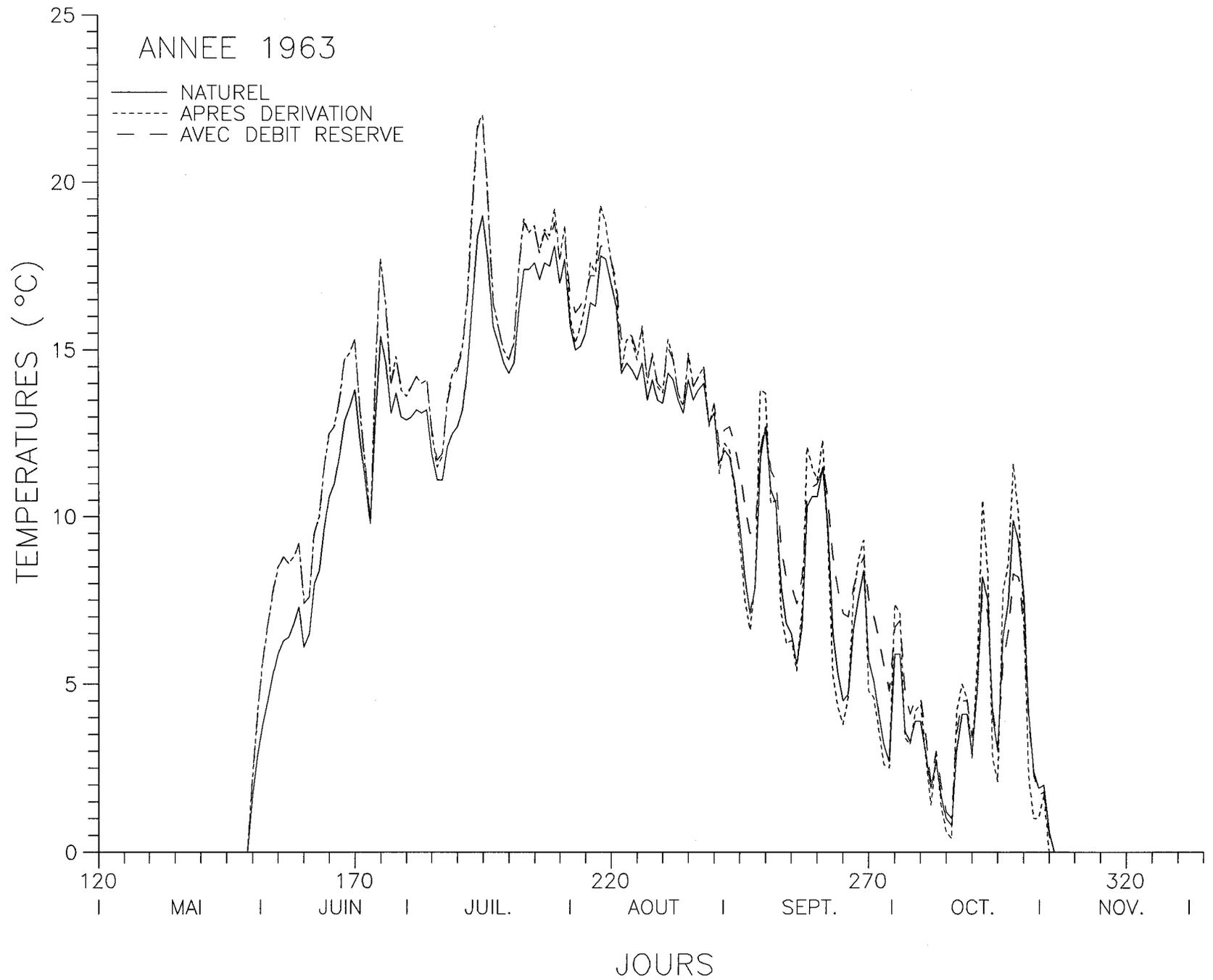


Figure C3 Temperature journaliere de l'eau: Aux Pekans a la station 072302

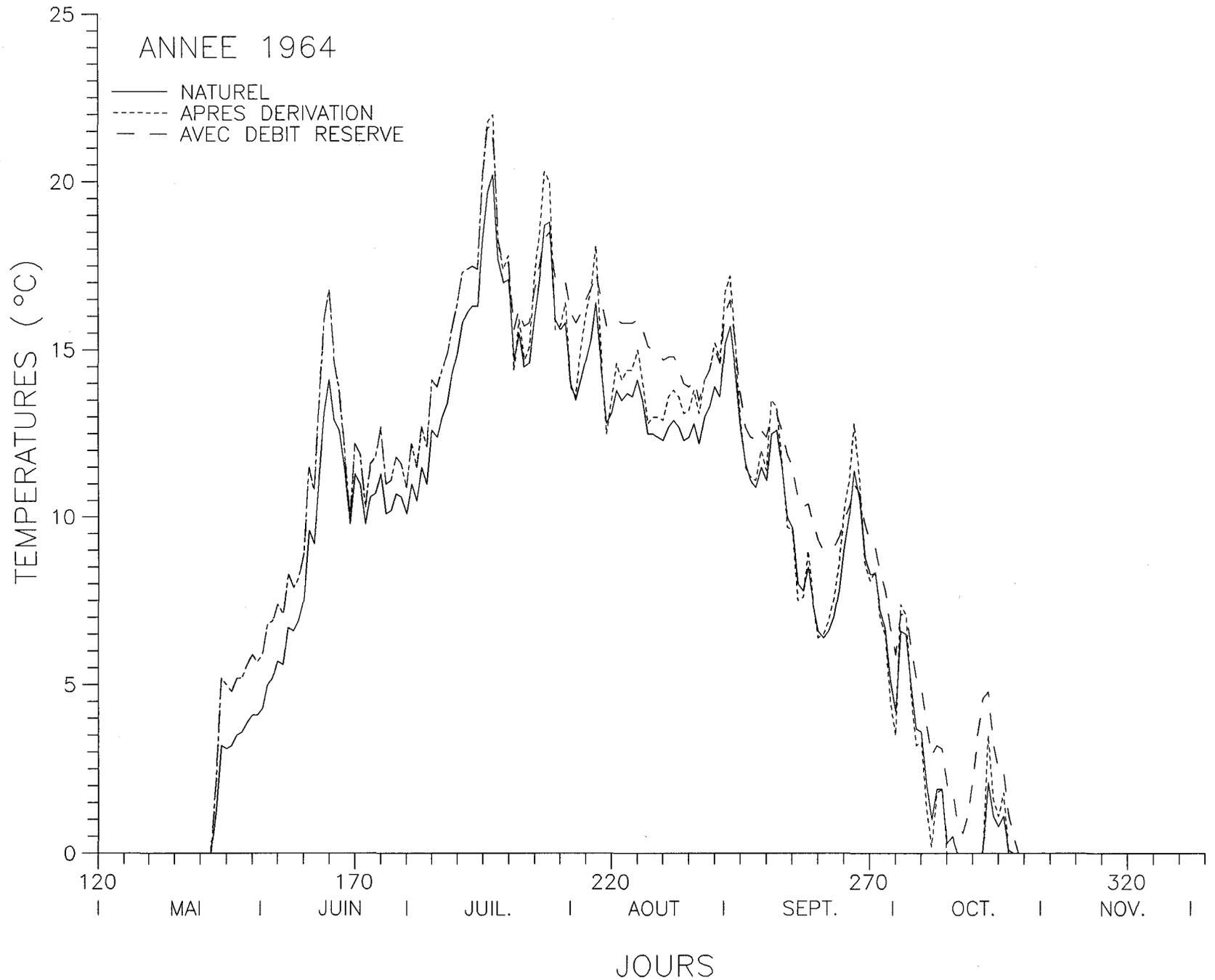


Figure C4 Temperature journaliere de l'eau: Aux Pekans a la station 072302

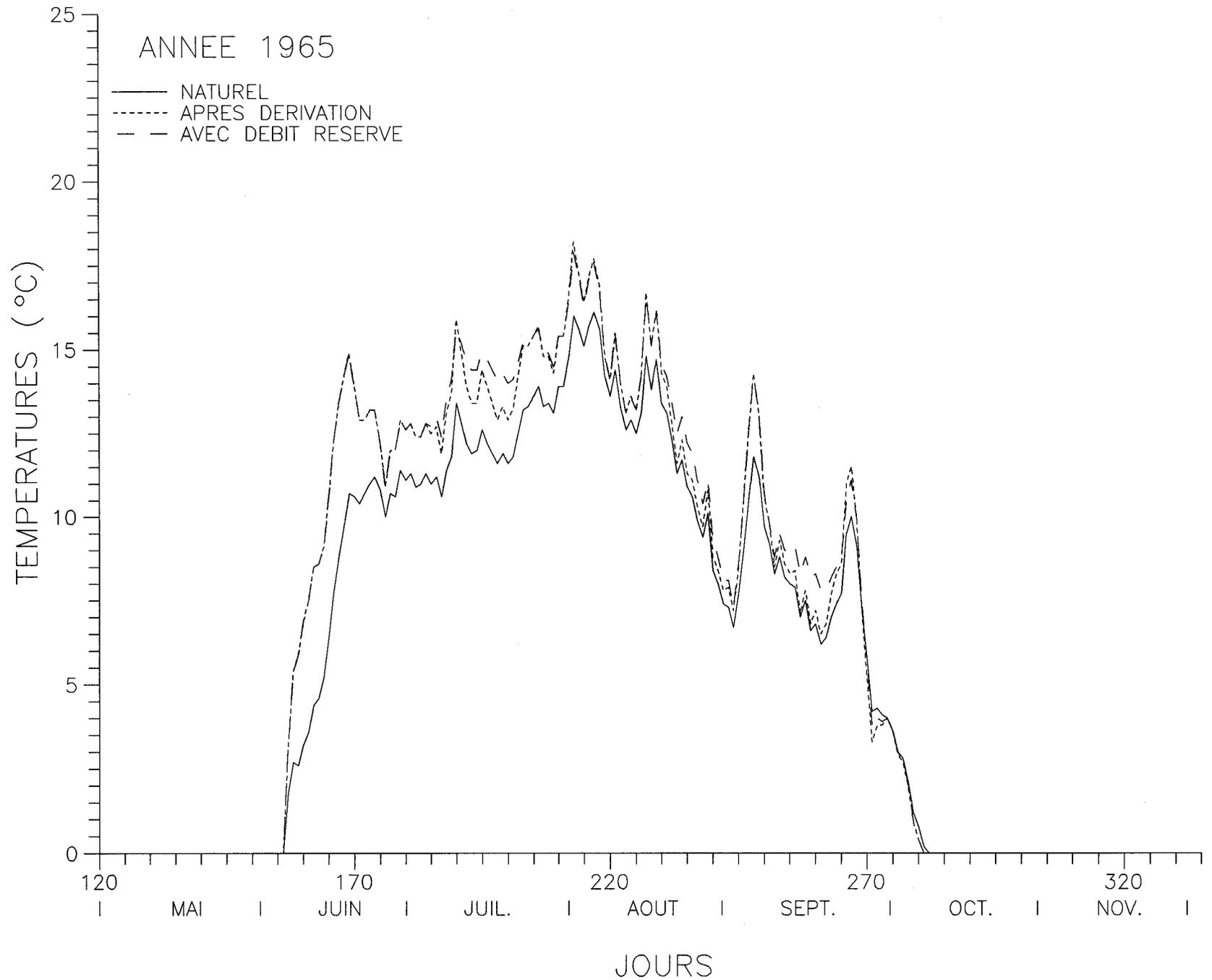


Figure C5 Temperature journaliere de l'eau: Aux Pekans a la station 072302

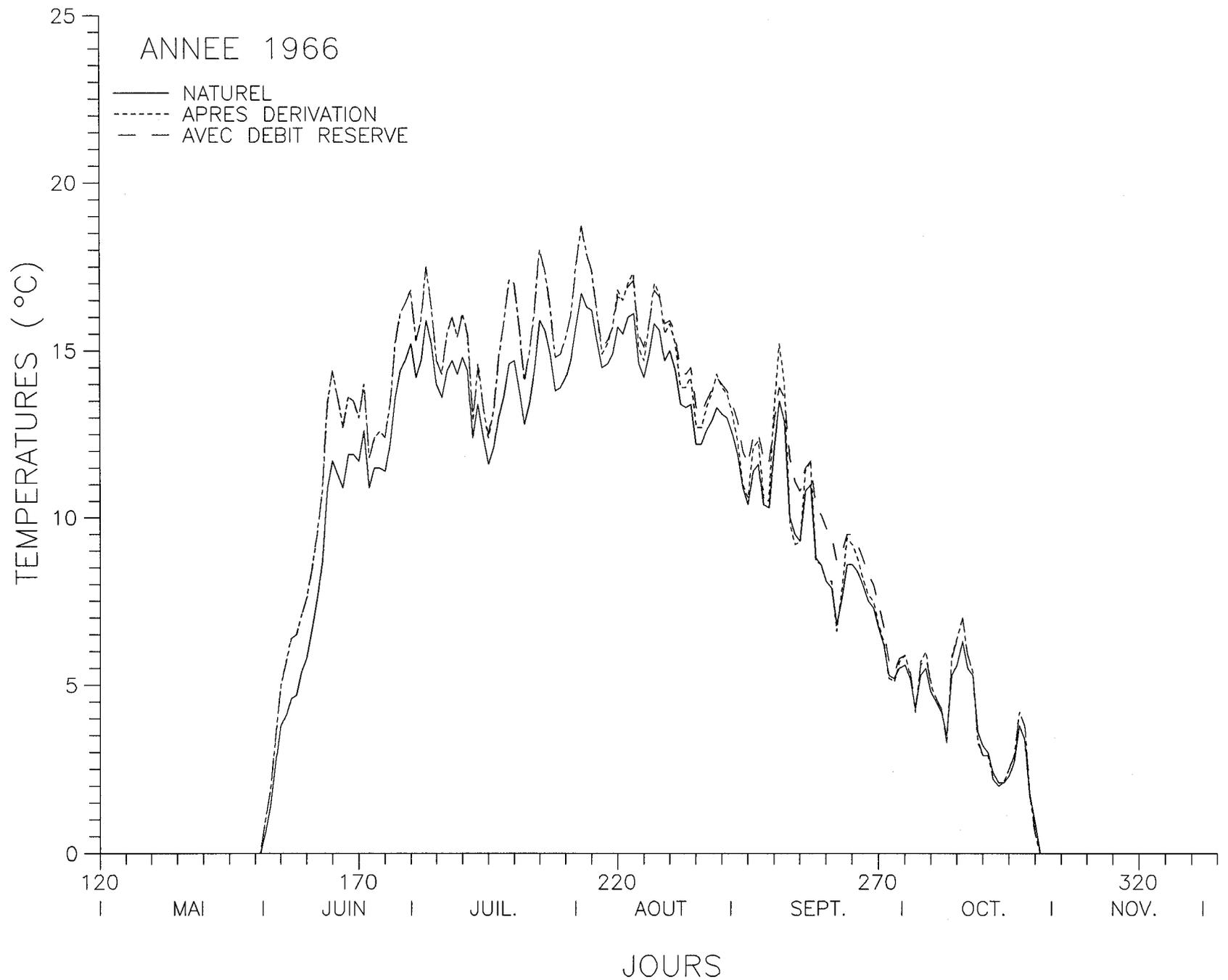


Figure C6 Temperature journaliere de l'eau: Aux Pekans a la station 072302

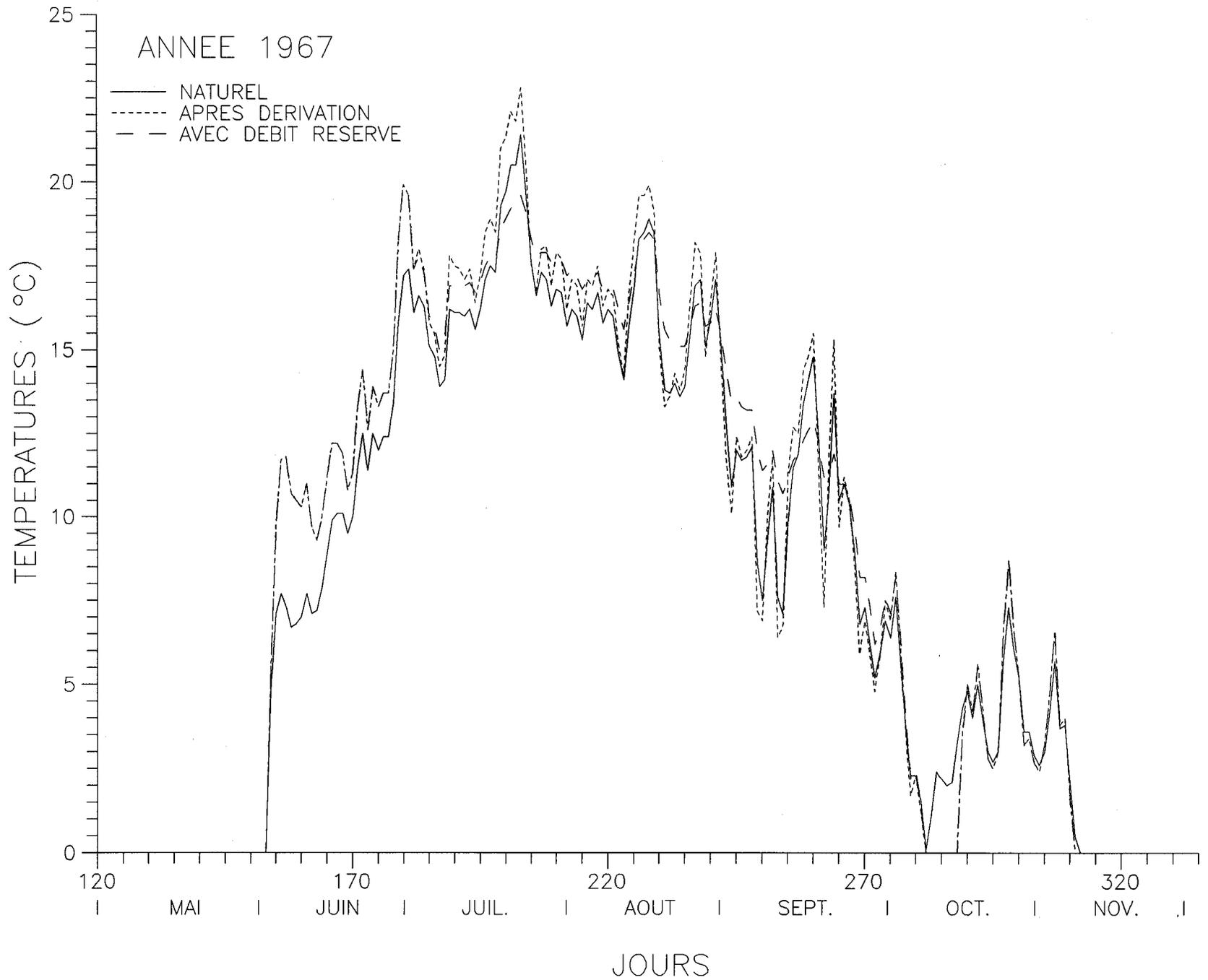


Figure C7 Temperature journaliere de l'eau: Aux Pekans a la station 072302



Figure C8 Temperature journaliere de l'eau: Aux Pekans a la station 072302

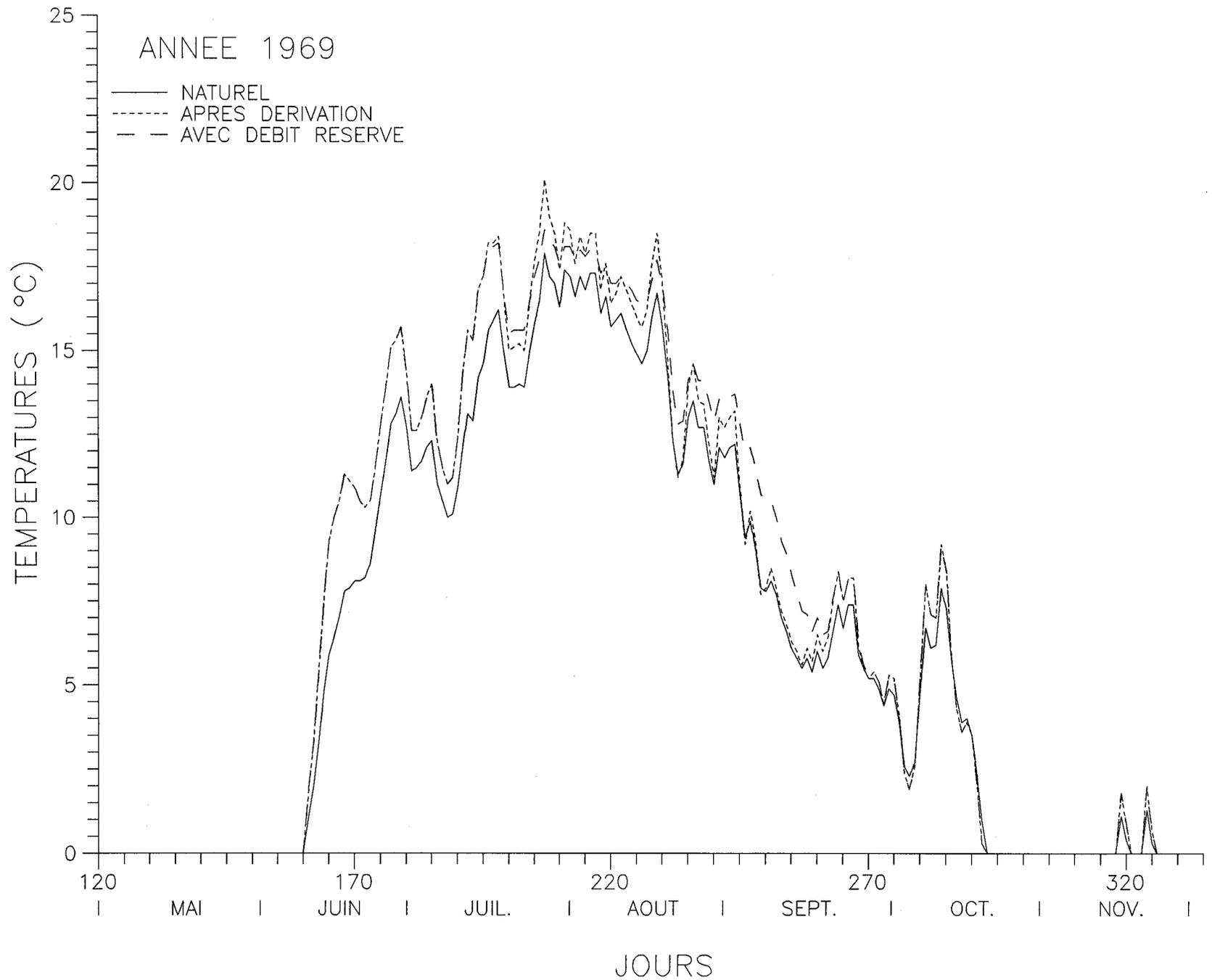


Figure c9 Temperature journaliere de l'eau: Aux Pekans a la station 072302

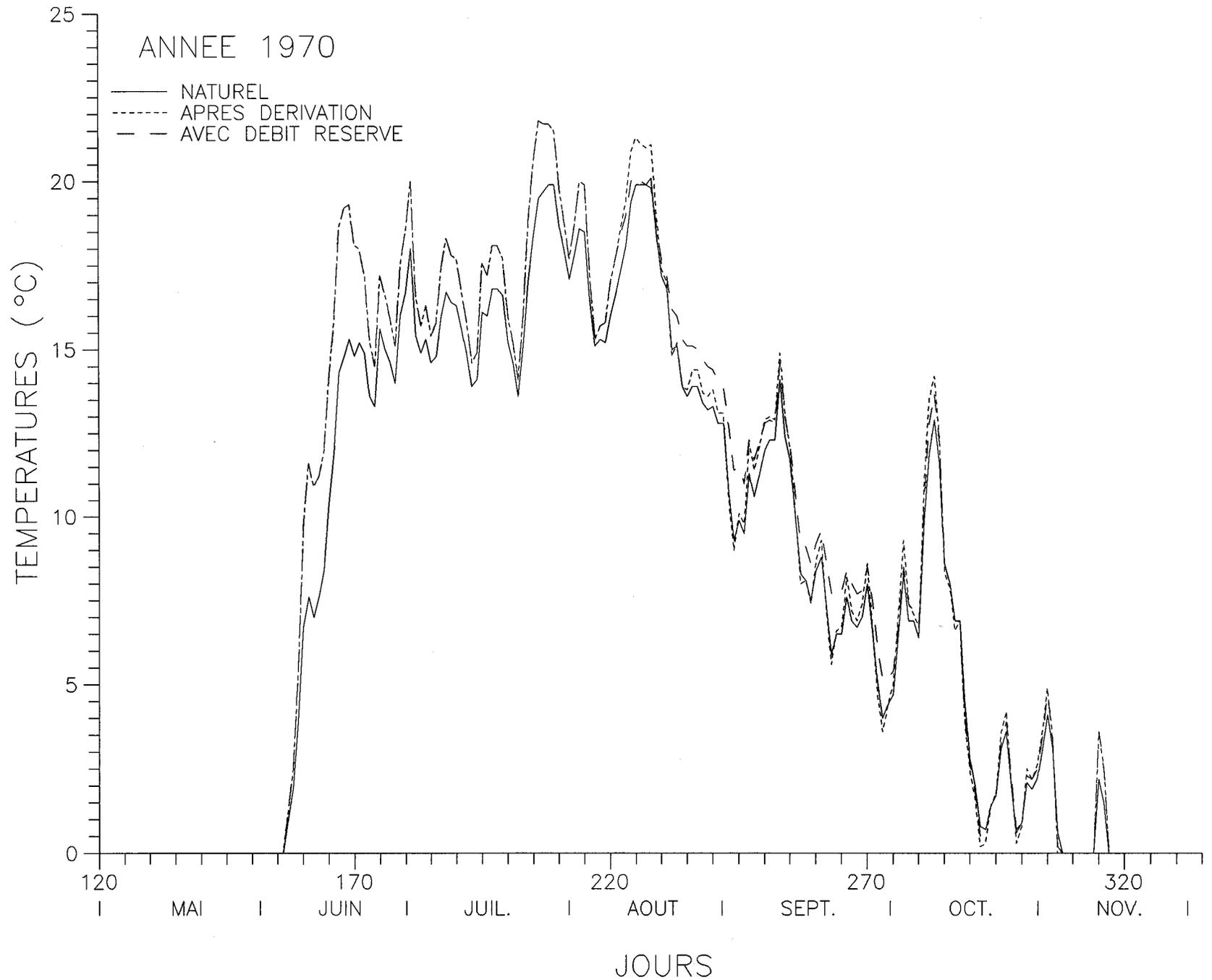


Figure C10 Temperature journaliere de l'eau: Aux Pekans a la station 072302

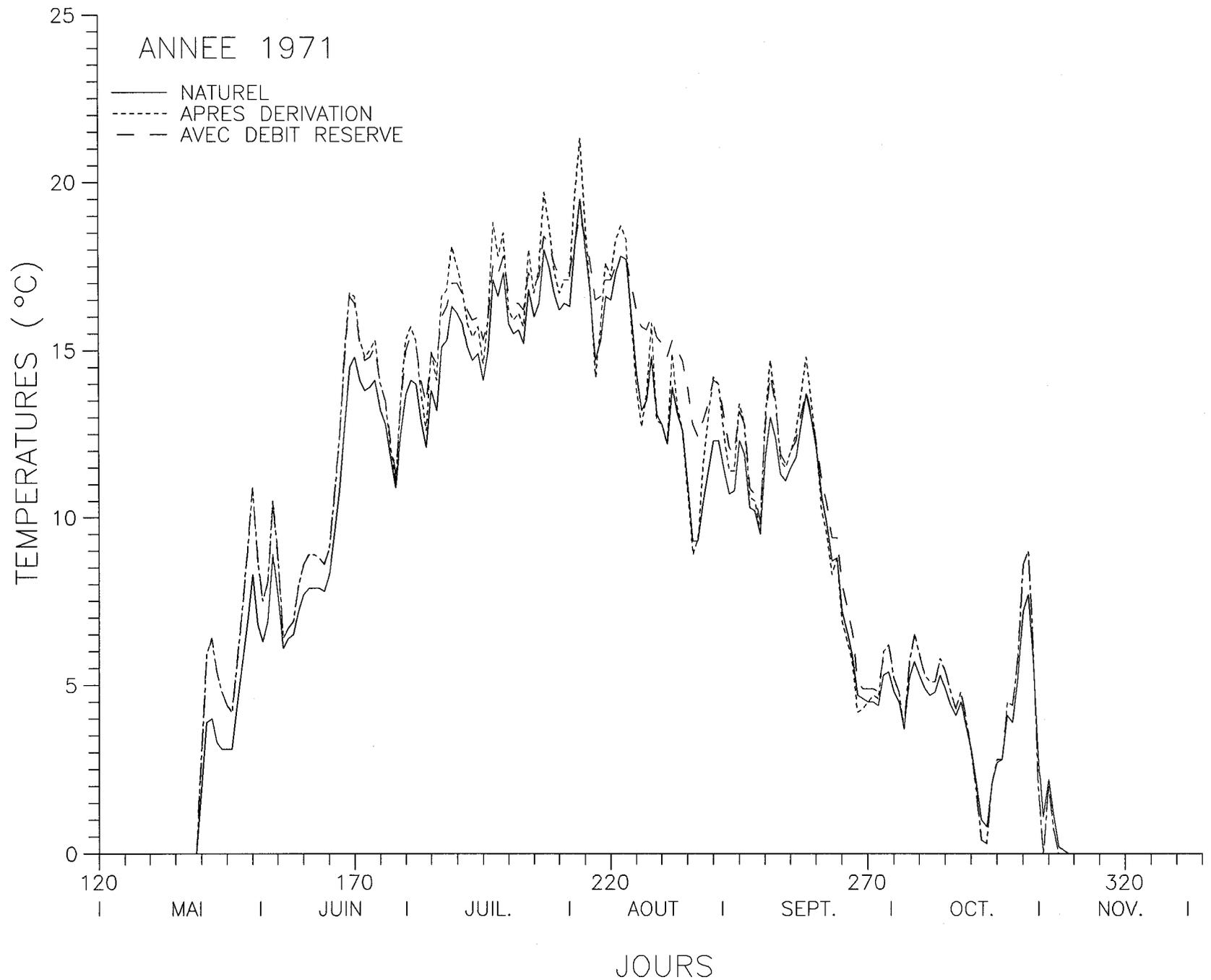


Figure C11 Temperature journaliere de l'eau: Aux Pekans a la station 072302

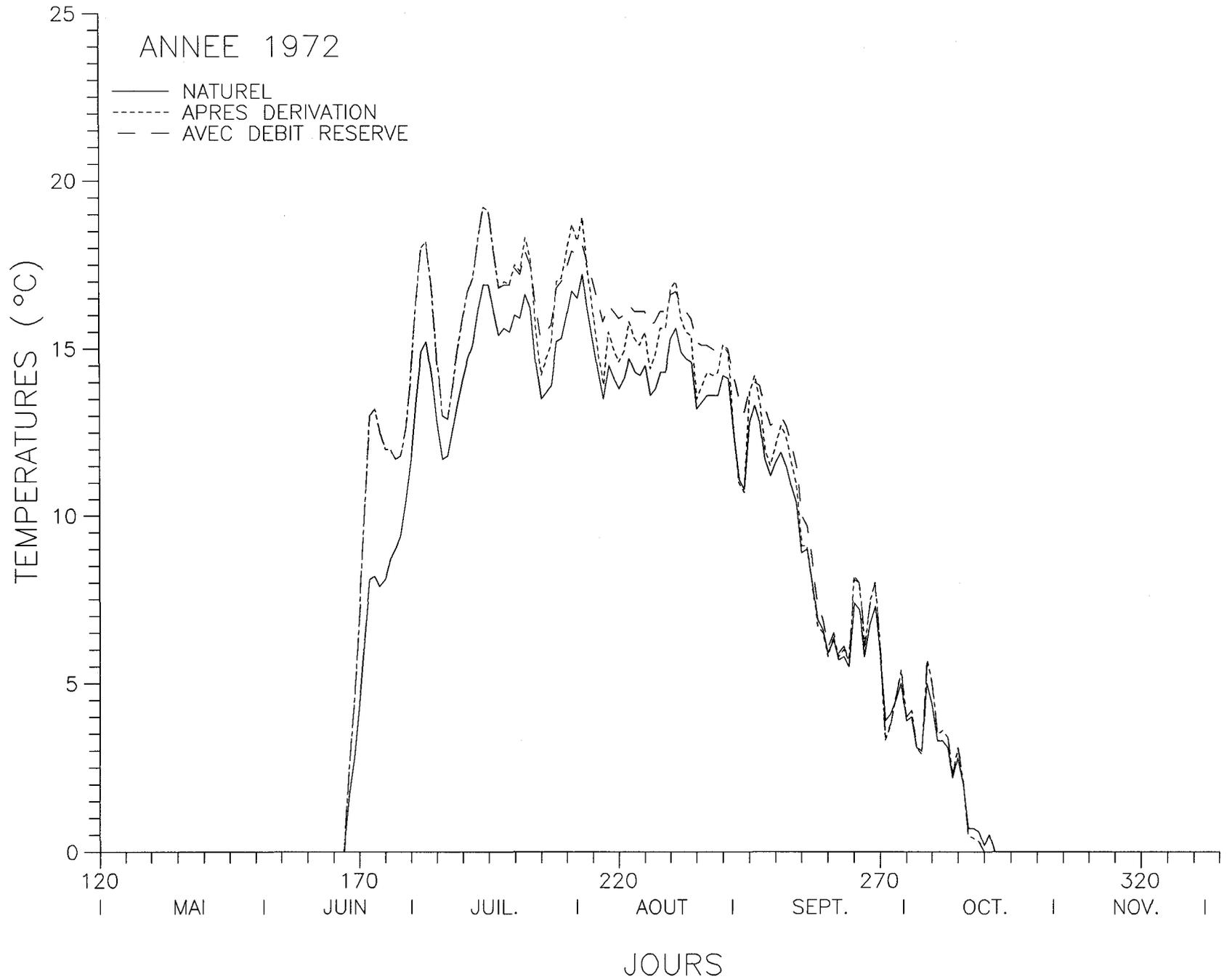


Figure C12 Temperature journaliere de l'eau: Aux Pekans a la station 072302

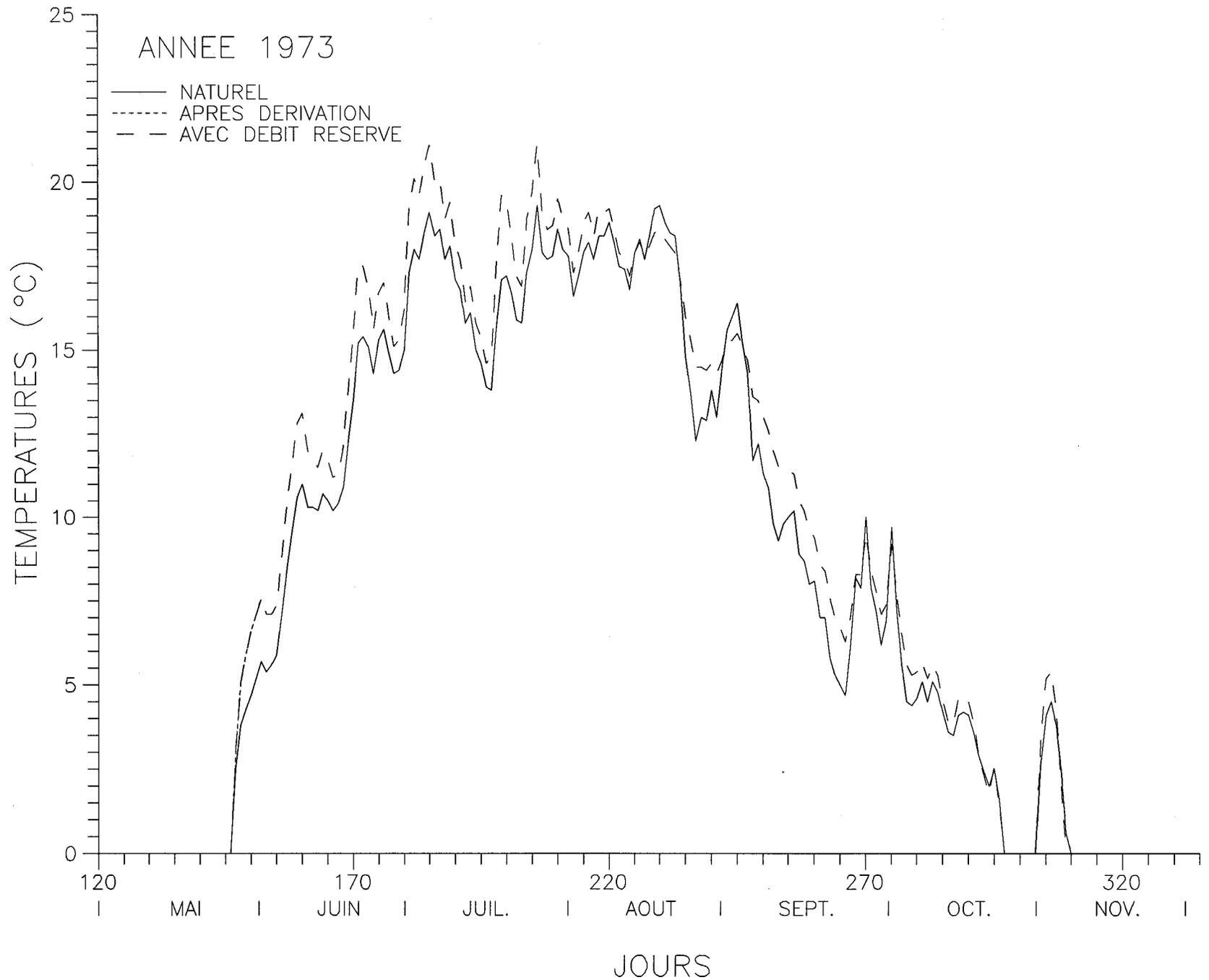


Figure C13 Temperature journaliere de l'eau: Aux Pekans a la station 072302

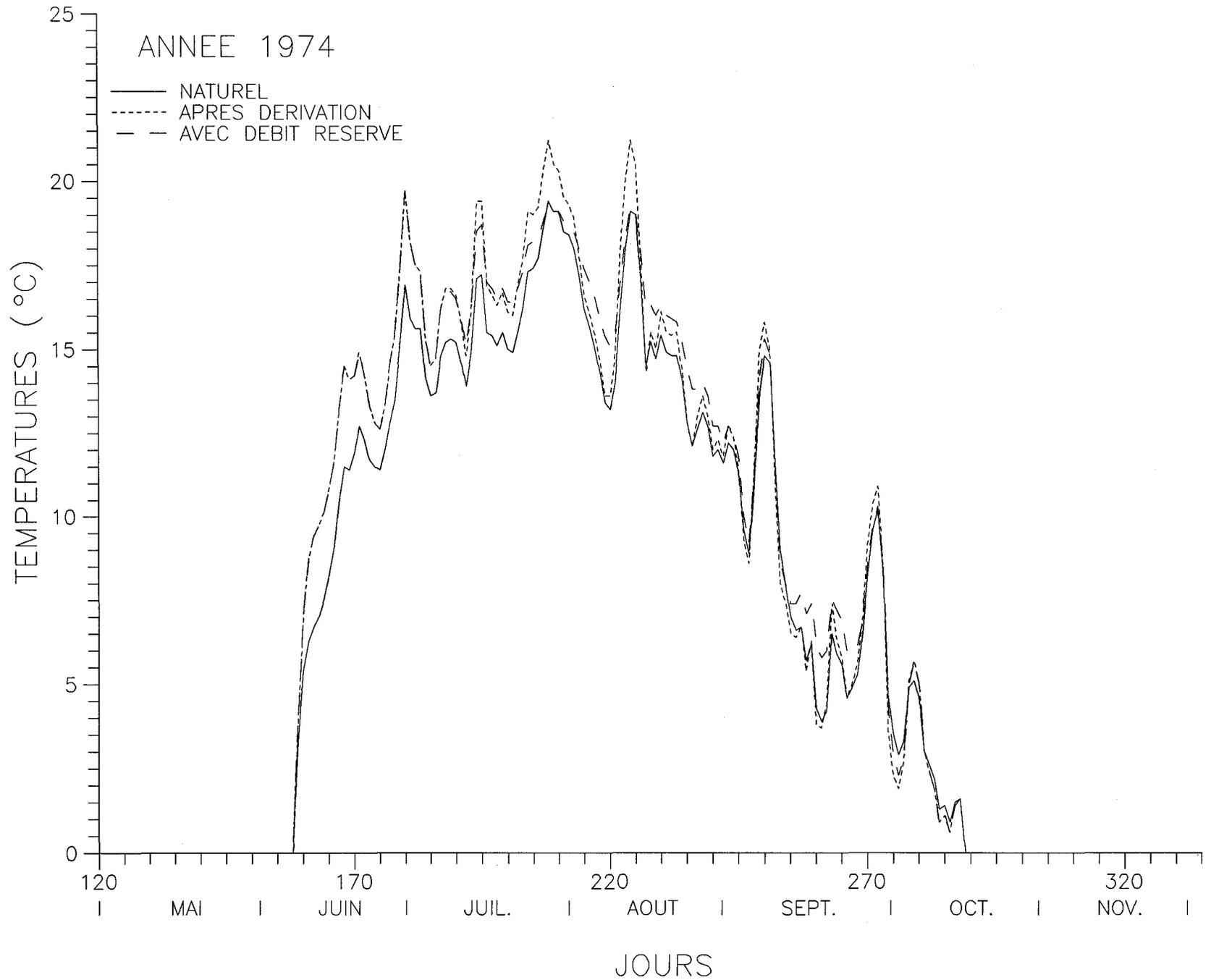


Figure C14 Temperature journaliere de l'eau: Aux Pekans a la station 072302

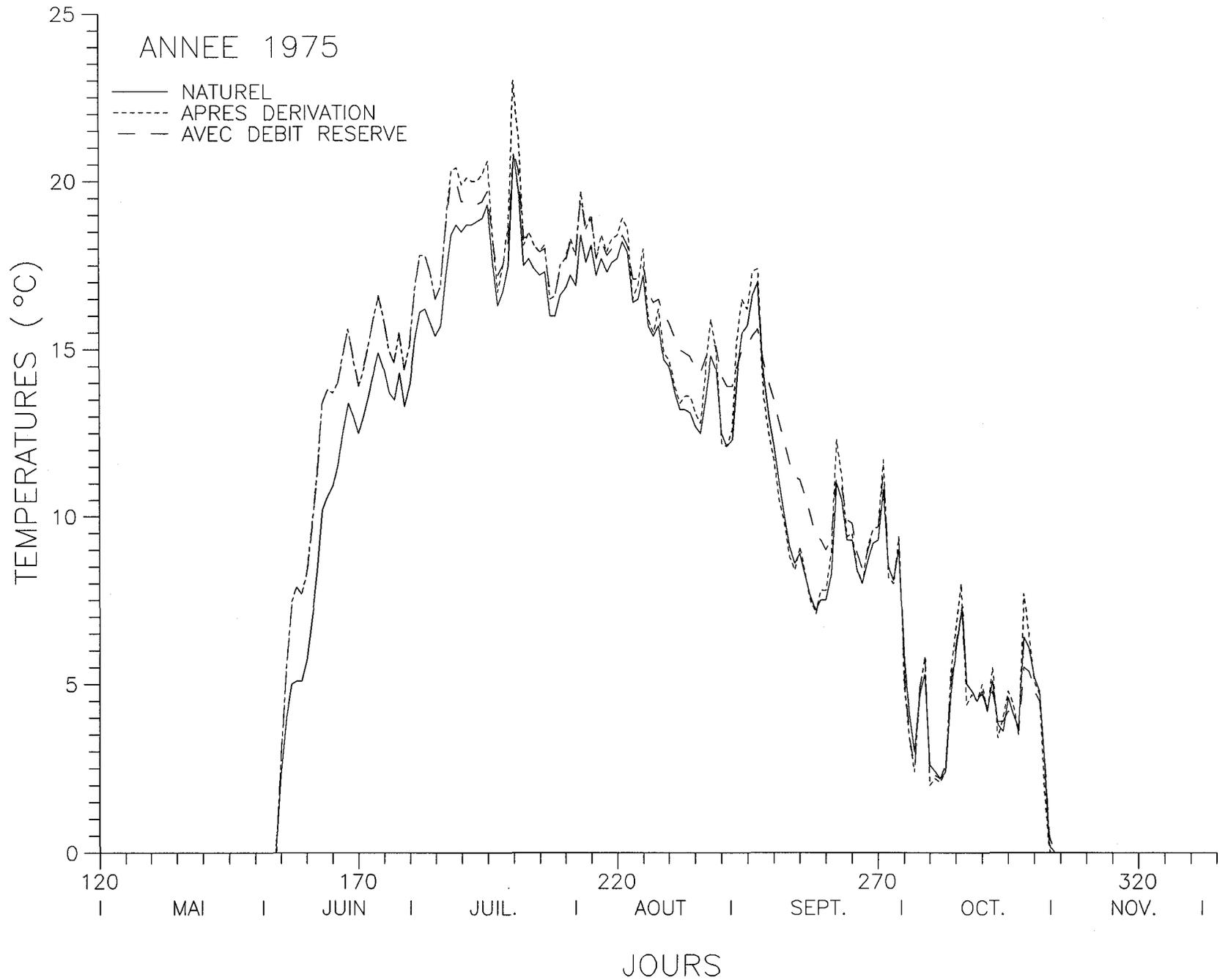


Figure C15 Temperature journaliere de l'eau: Aux Pekans a la station 072302

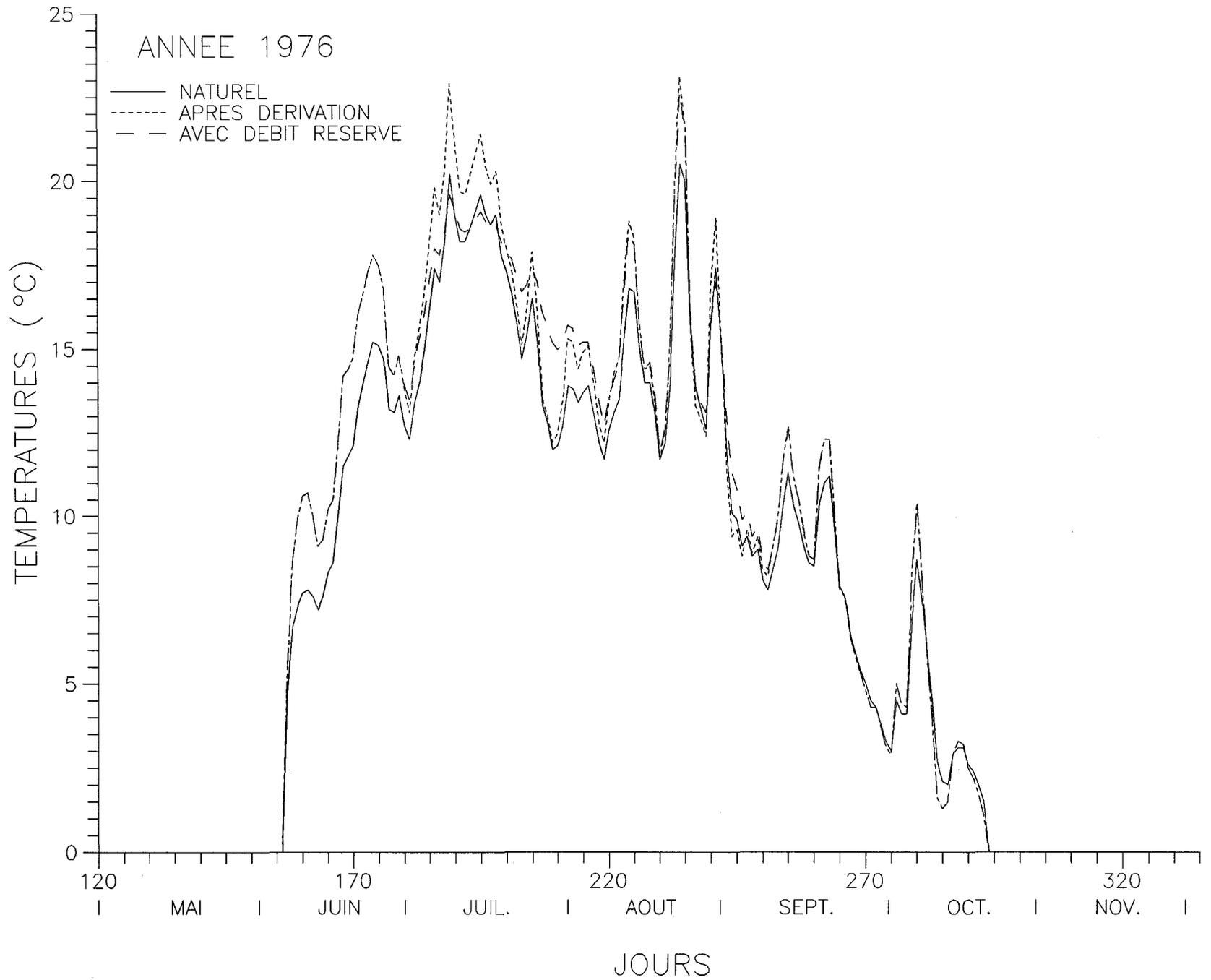


Figure C16 Temperature journaliere de l'eau: Aux Pekans a la station 072302

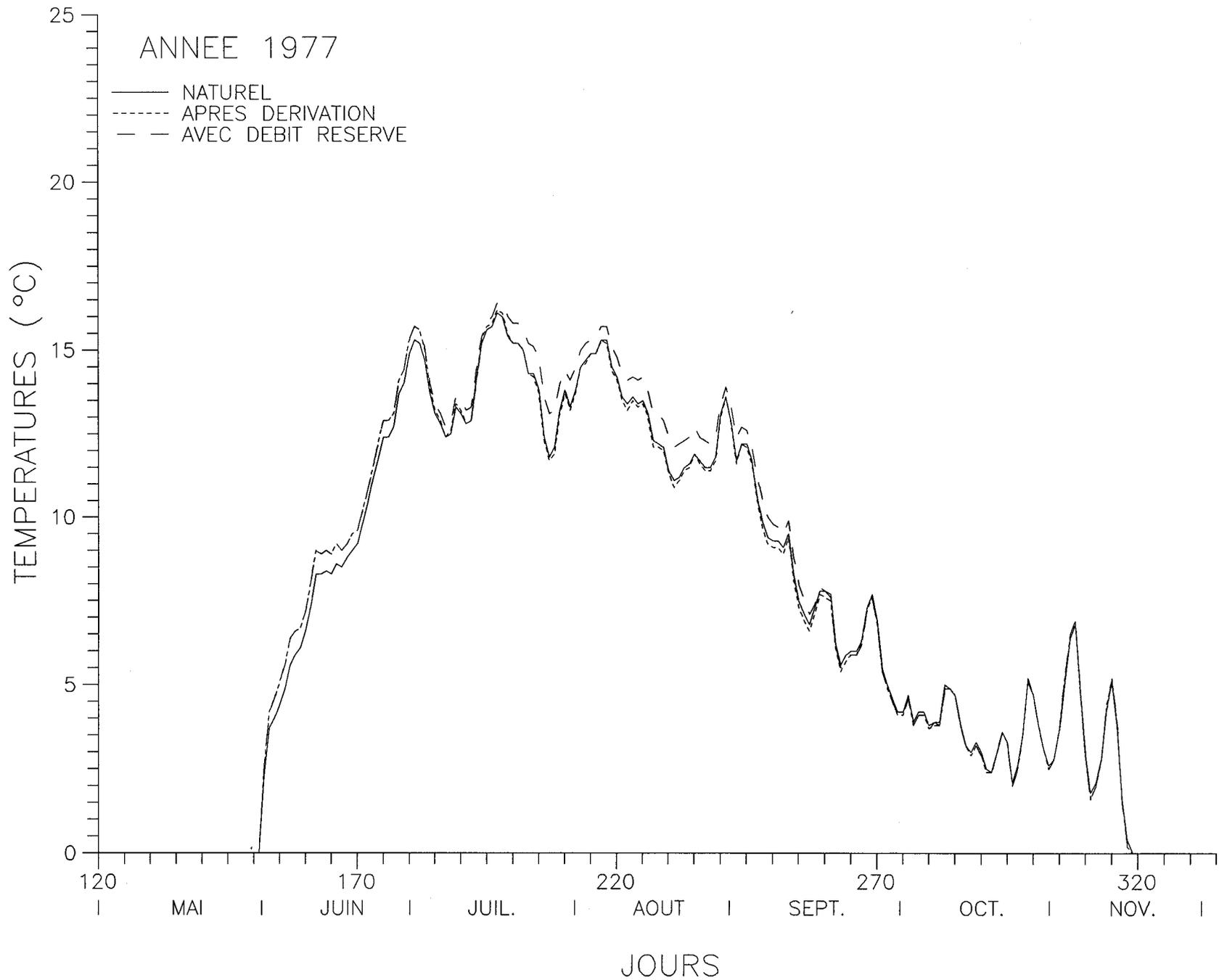


Figure C17 Temperature journaliere de l'eau: Moisie en aval de la riviere aux Pekans

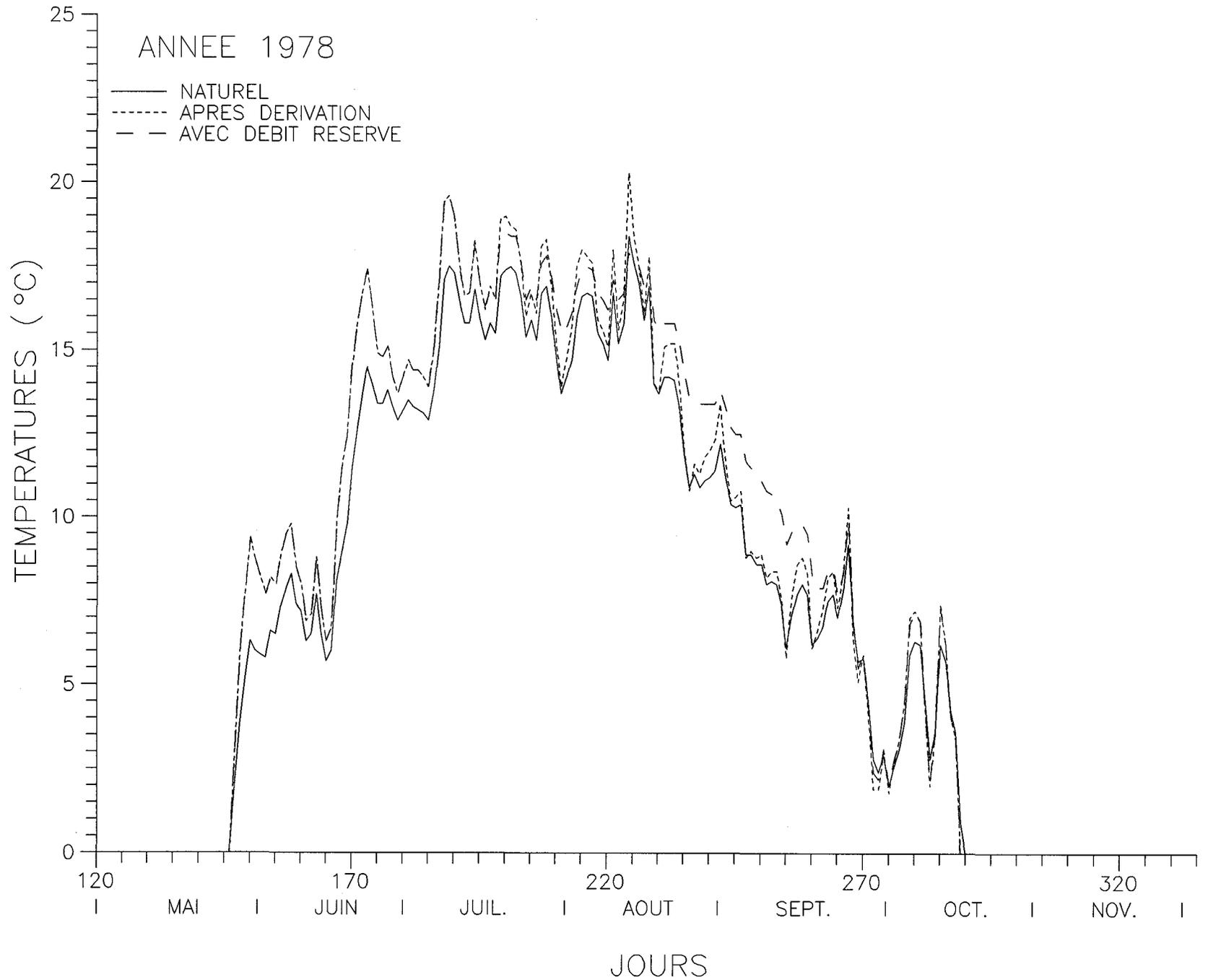


Figure C18 Temperature journaliere de l'eau: Aux Pekans a la station 072302

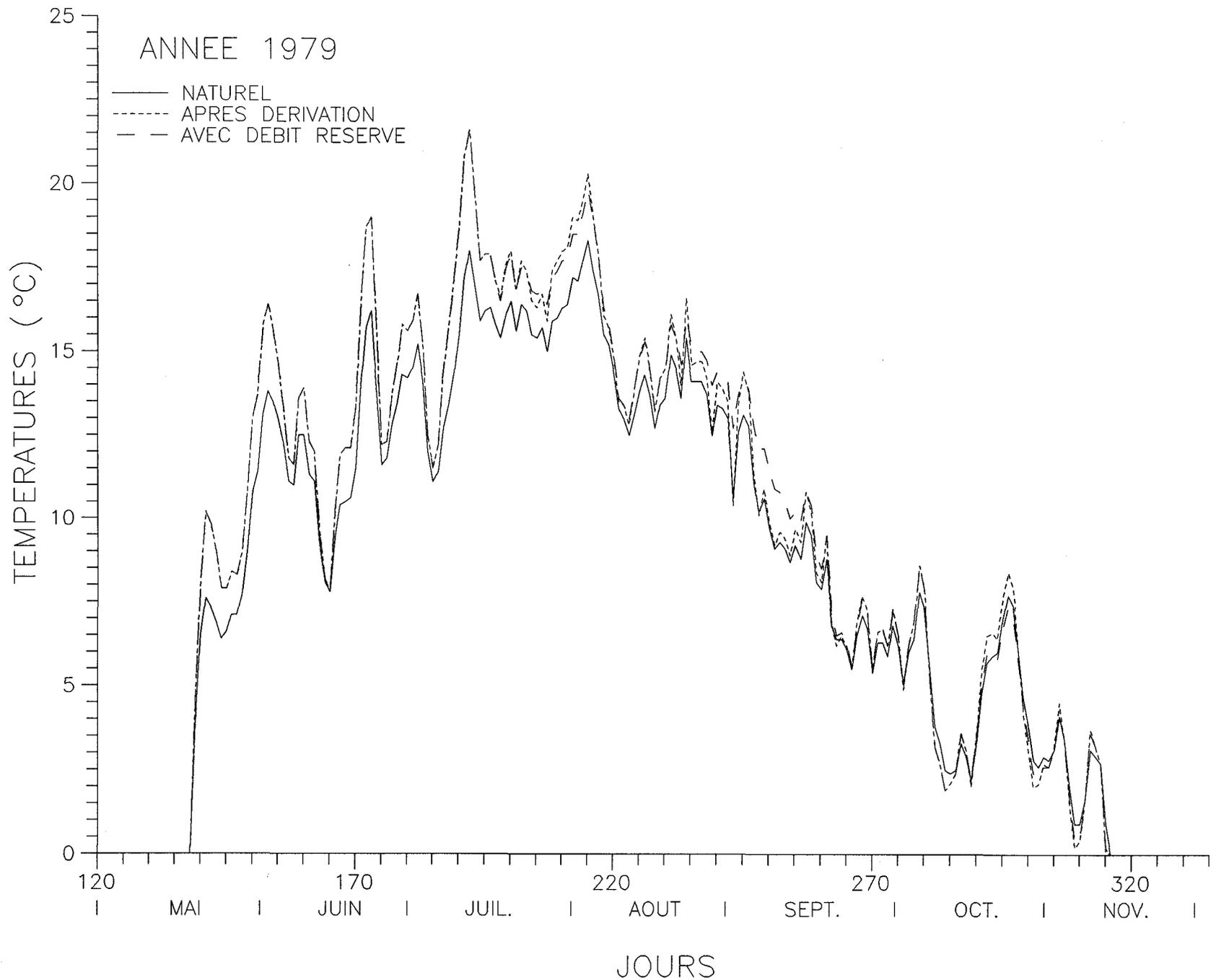


Figure C19 Temperature journaliere de l'eau: Aux Pekans a la station 072302

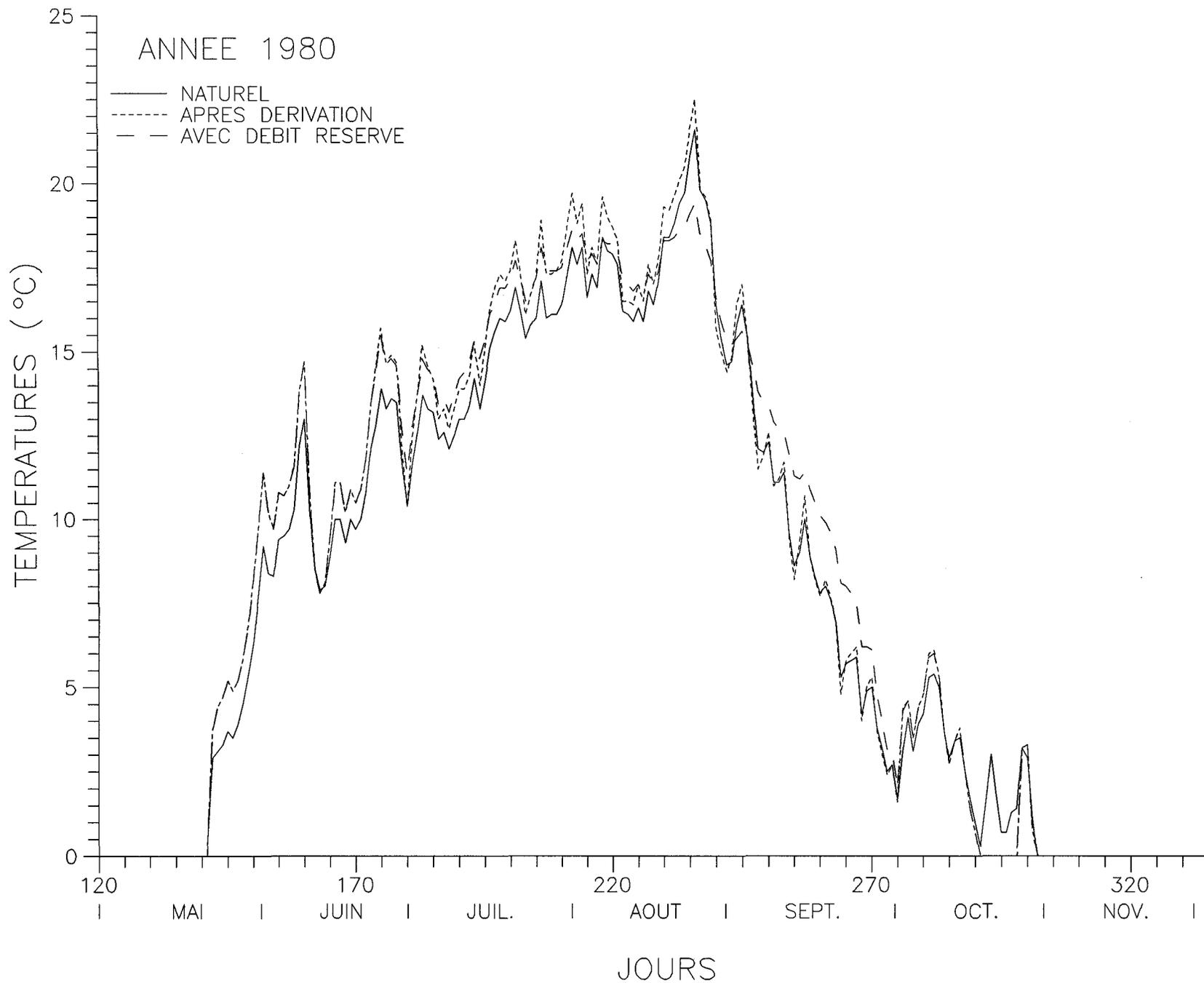


Figure C20 Temperature journaliere de l'eau: Aux Pekans a la station 072302

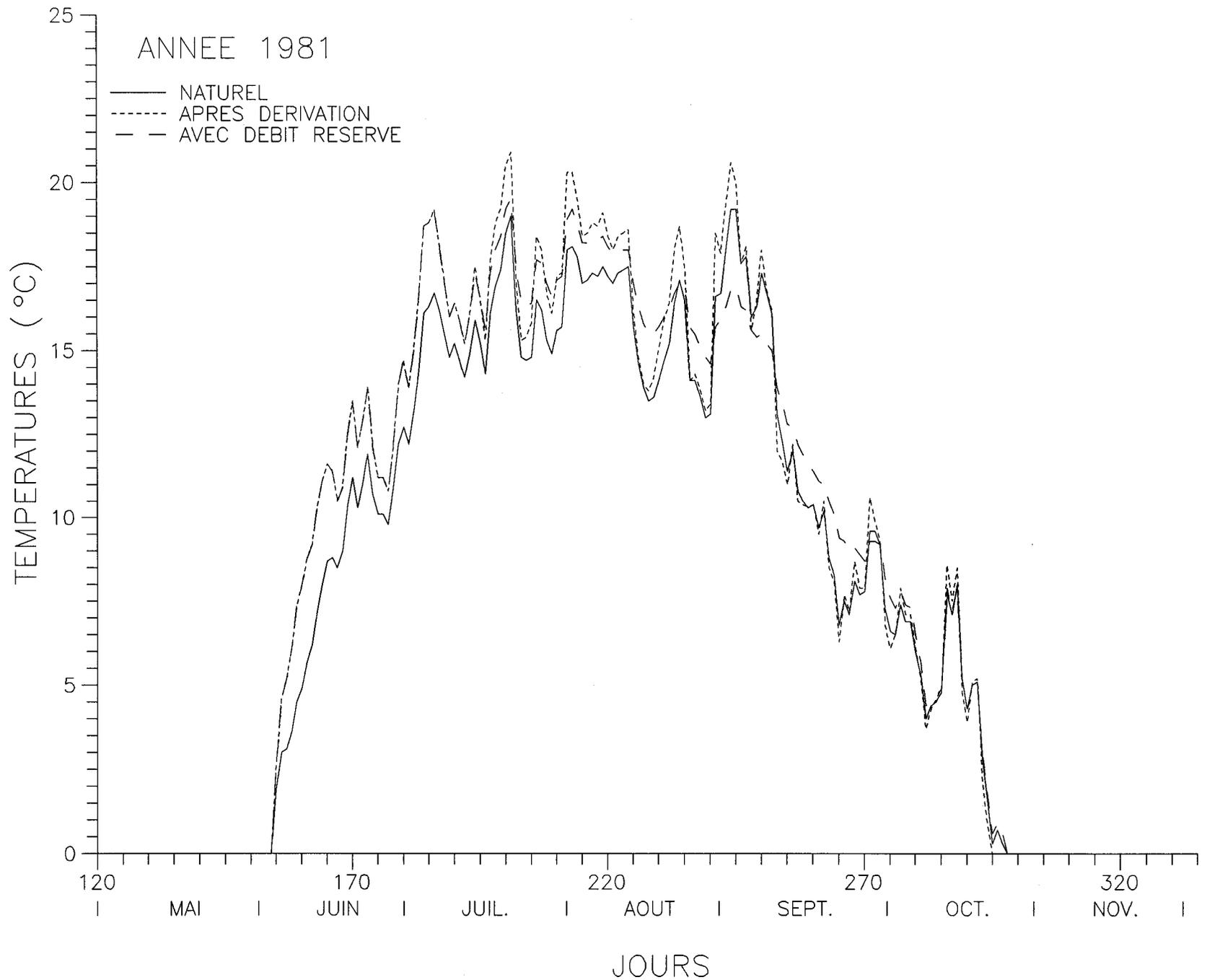


Figure C21 Temperature journaliere de l'eau: Aux Pekans a la station 072302

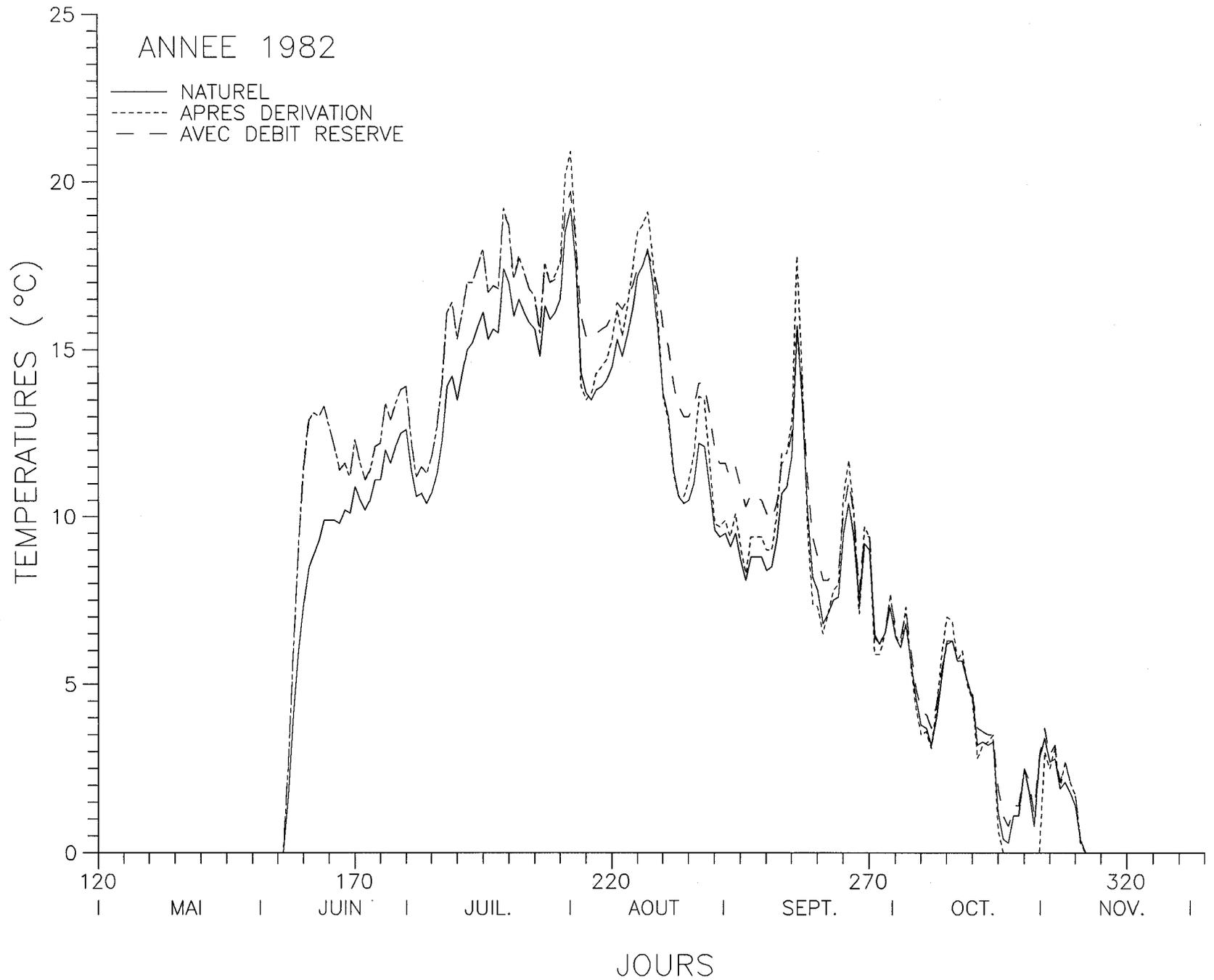


Figure C22 Temperature journaliere de l'eau: Aux Pekans a la station 072302

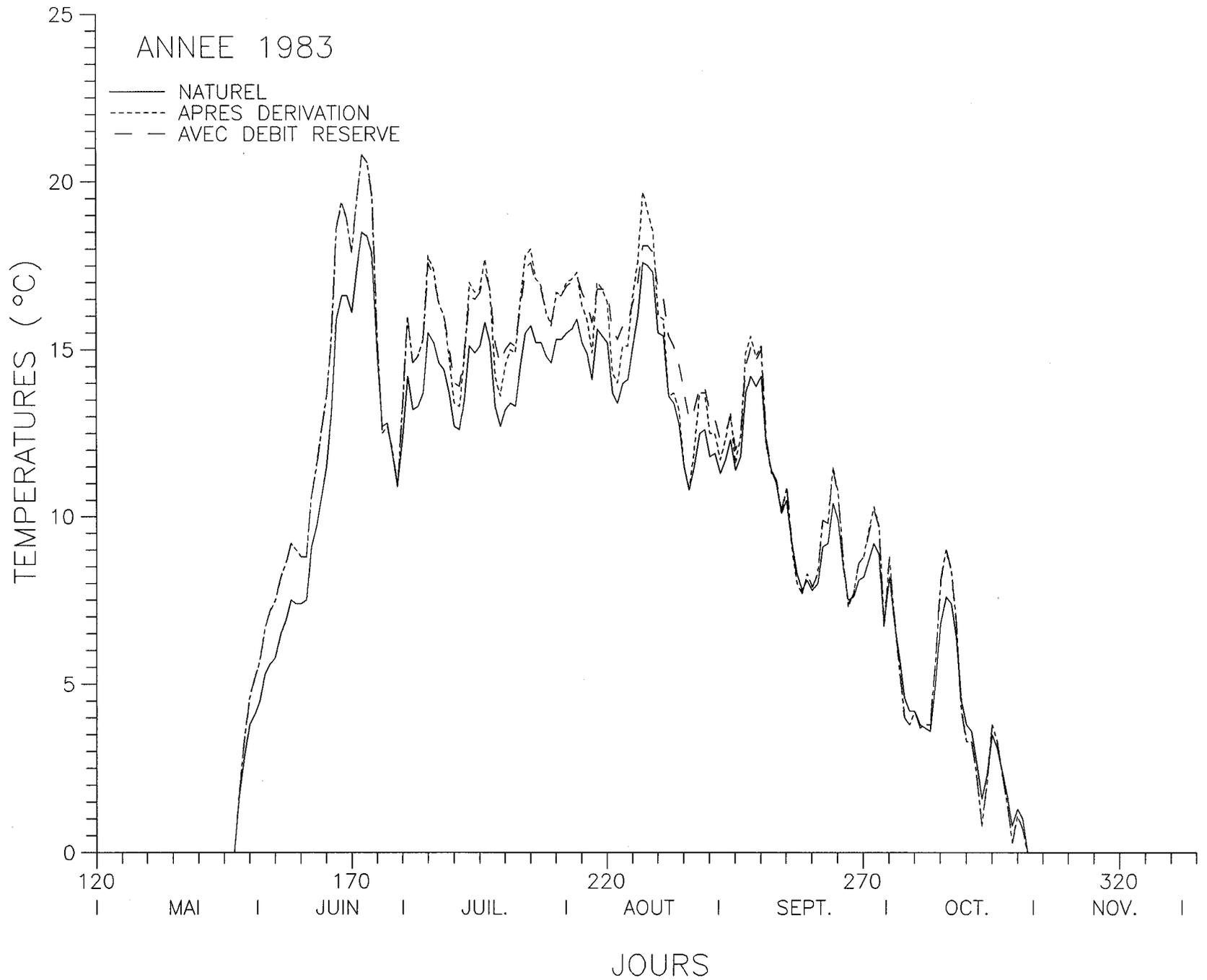


Figure C23 Temperature journaliere de l'eau: Aux Pekans a la station 072302

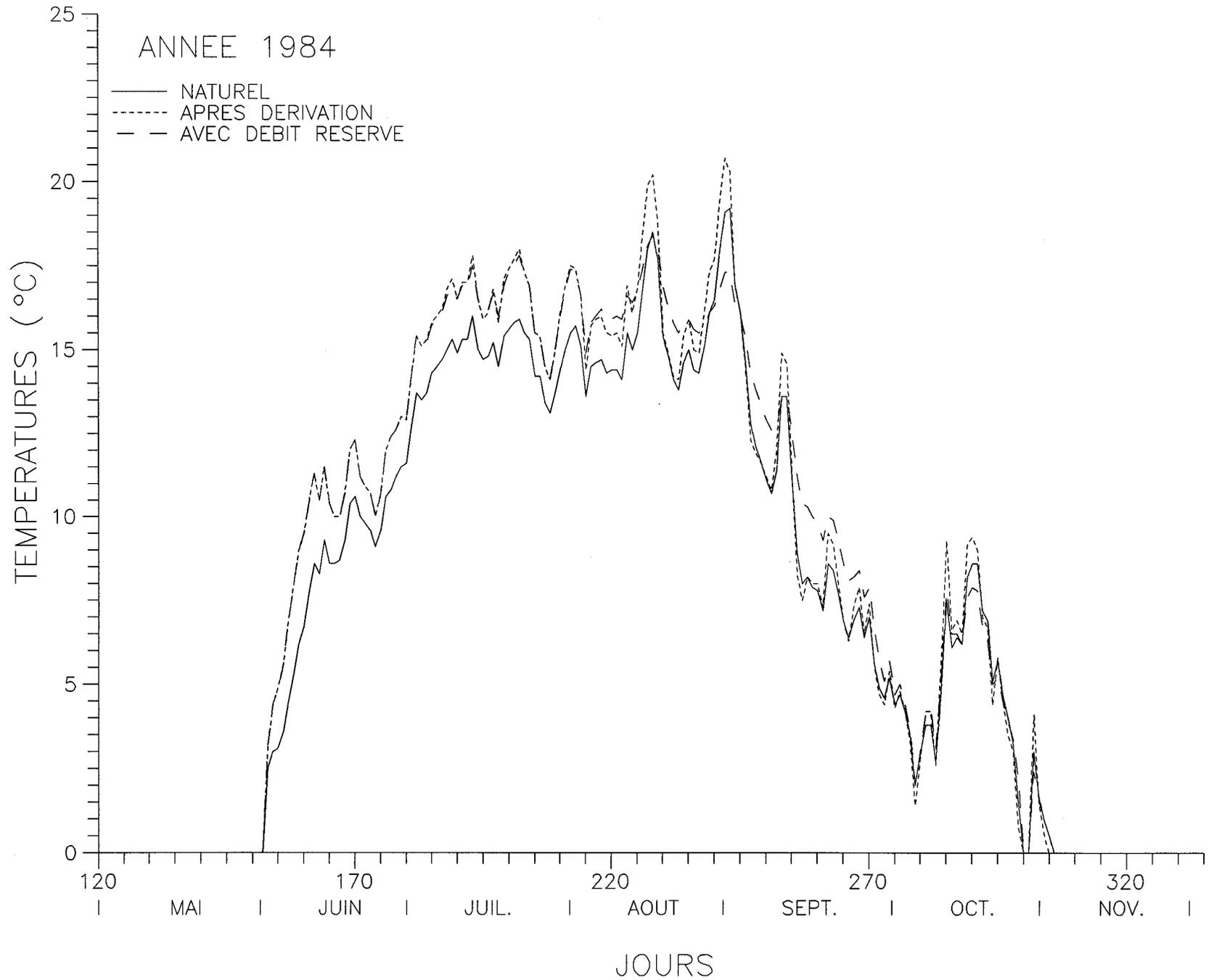


Figure C24 Temperature journaliere de l'eau: Aux Pekans a la station 072302



Figure C25 Temperature journaliere de l'eau: Aux Pekans a la station 072302

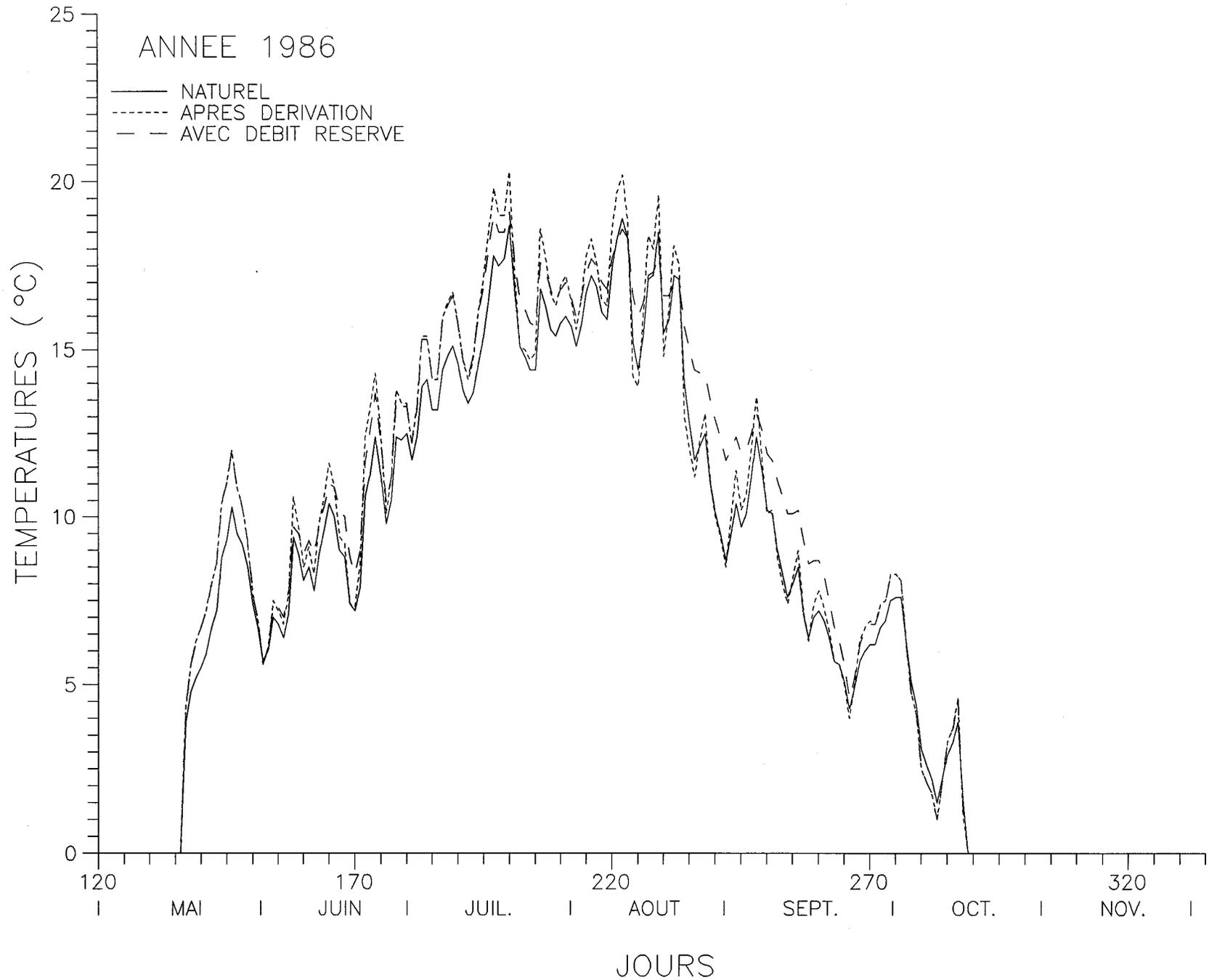


Figure C26 Temperature journaliere de l'eau: Aux Pekans a la station 072302



Figure C27 Temperature journaliere de l'eau: Aux Pekans a la station 072302

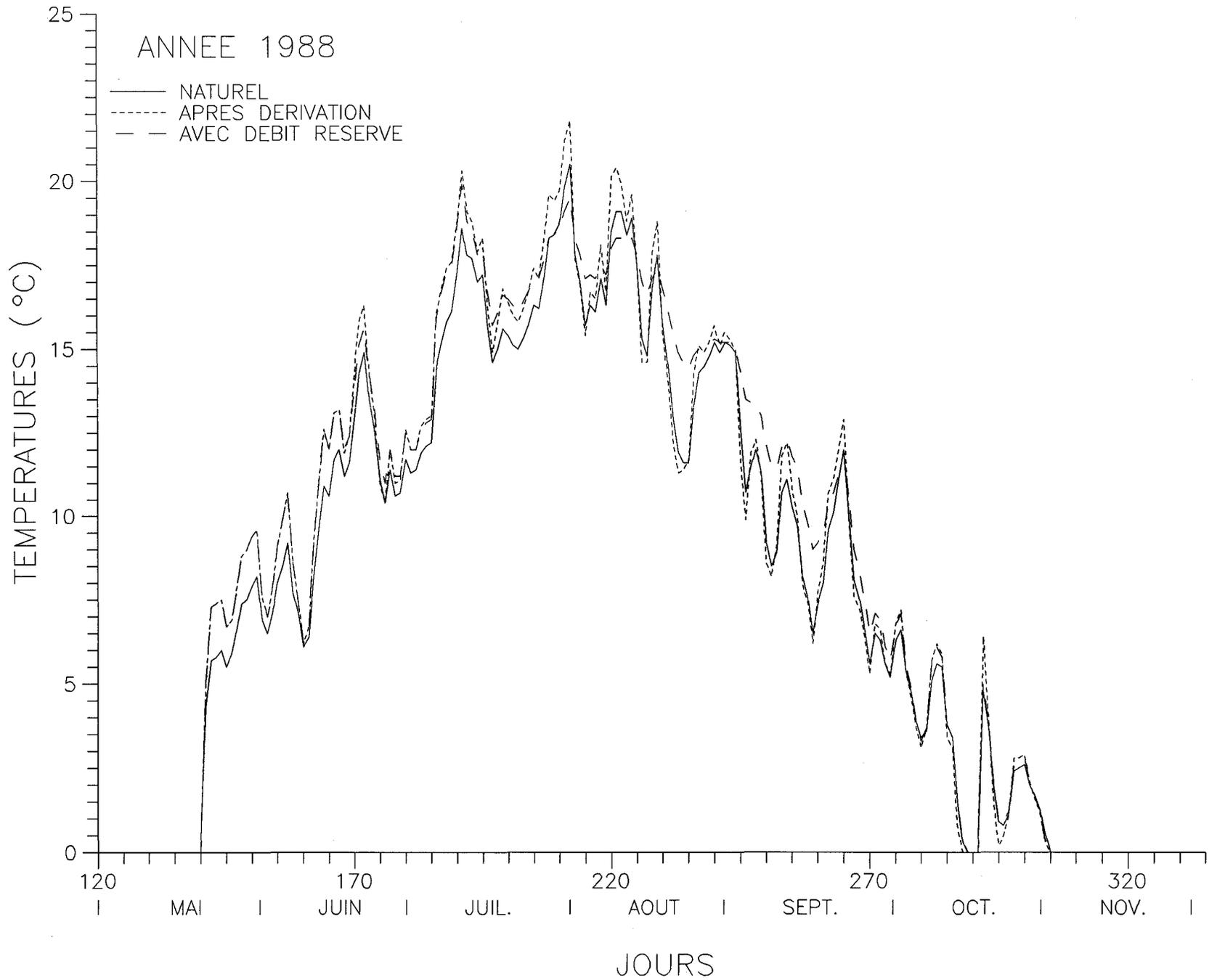


Figure C28 Temperature journaliere de l'eau: Aux Pekans a la station 072302

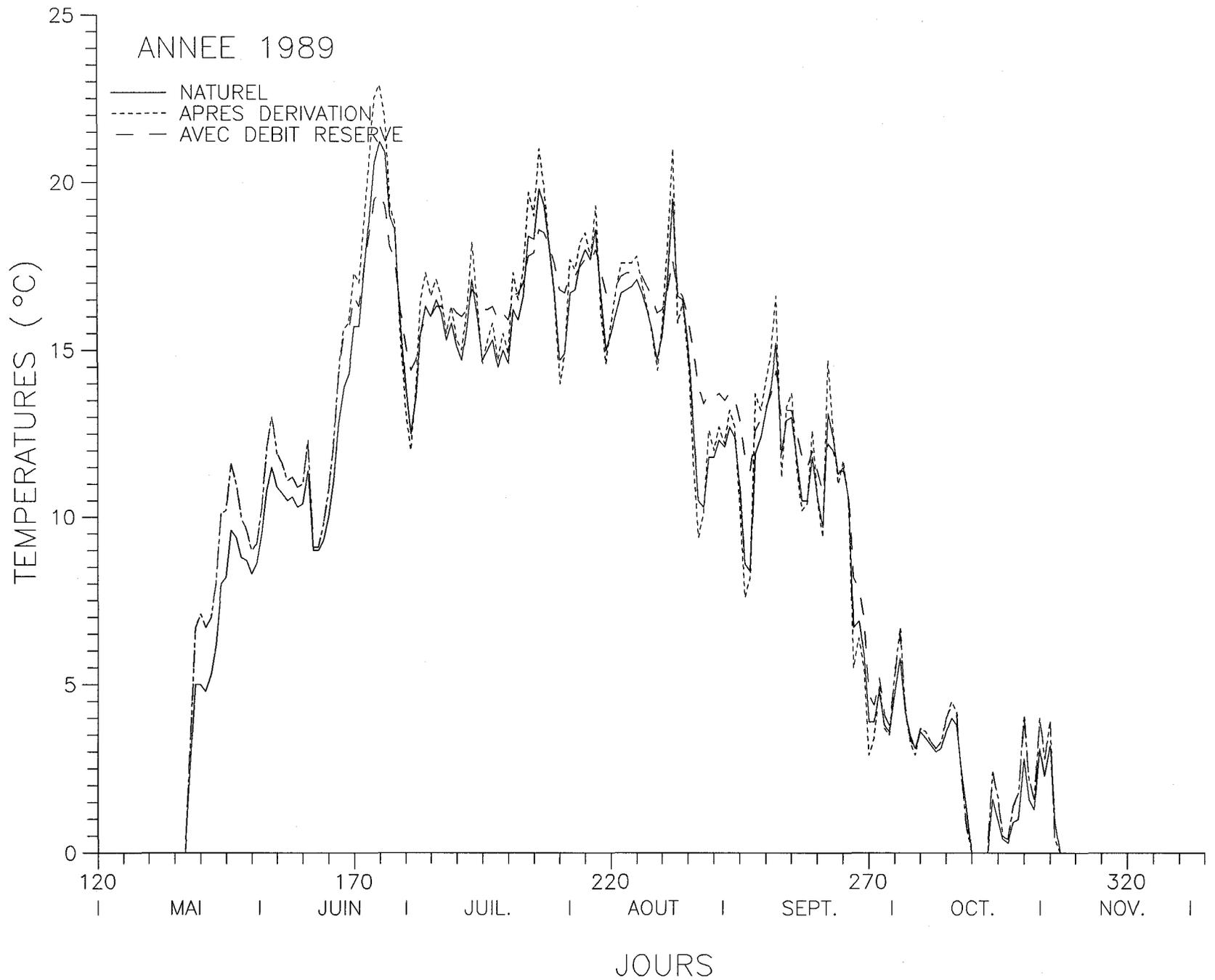


Figure C29 Temperature journaliere de l'eau: Aux Pekans a la station 072302