



Environnement
Canada

Environment
Canada

Démonstration du modèle d'analyse d'utilisation de l'eau (WUAM)

A.M. Kassem, D.M. Tate et P.A. Dossett



Étude n° 28, Collection des sciences sociales

Service de la conservation de l'environnement
Ottawa (Ontario), 1994

(Available in English on request)

Canada



Environnement
Canada

Environment
Canada

Démonstration du modèle d'analyse d'utilisation de l'eau (WUAM)

A.M. Kassem, D.M. Tate et P.A. Dossett

Étude n° 28, Collection des sciences sociales

Service de la conservation de l'environnement
Ottawa (Ontario), 1994

(Available in English on request)



Imprimé sur du papier contenant des rebuts récupérés

Publié avec l'autorisation
du ministre de l'Environnement

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1994
N° de cat. En 36-507/28F
ISBN 0-662-99911-8

Table des matières

	Page
RÉSUMÉ	vi
ABSTRACT	vii
PRÉFACE	viii
REMERCIEMENTS	ix
1. INTRODUCTION	1
1.1 Le modèle d'analyse d'utilisation de l'eau (WUAM)	1
1.2 Objectifs de l'étude	2
1.3 Portée de l'étude	2
2. MISE EN PLACE DU MODÈLE POUR LE BASSIN DE LA RIVIÈRE SASKATCHEWAN SUD	5
2.1 Zone d'étude et réseau WUAM	5
2.2 Préparation des données	5
2.2.1 Données sur la consommation d'eau de l'industrie	5
2.2.2 Données sur la consommation d'eau urbaine et rurale	7
2.2.3 Données sur les utilisations agricoles de l'eau	7
2.2.4 Données sur les apports en eau	7
2.2.5 Données sur la répartition interprovinciale	7
2.2.6 Données sur l'exploitation du réservoir du lac Diefenbaker	7
2.3 Scénarios d'application	13
2.3.1 Hypothèses de croissance	13
2.3.2 Données du scénario de développement de l'irrigation	15
2.3.3 Période de simulation	16
3. ANALYSE DES RÉSULTATS	21
3.1 Consommation des prélèvements d'eau	21
3.1.1 Utilisation de l'eau à des fins d'irrigation	22
3.1.1.1 Analyse de fréquence de l'utilisation de l'eau à des fins d'irrigation	22
3.2 Lac Diefenbaker	23
3.2.1 Nature des prélèvements d'eau	23
3.2.1.1 Analyse de fréquence des prélèvements d'eau dans le lac Diefenbaker	25
3.2.2 Répercussions pour les débits sortants et les niveaux du lac Diefenbaker	26
3.2.2.1 Répercussions pour les usages récréatifs	34
3.2.2.2 Répercussions sur les utilisations <i>in situ</i> du cours d'eau en aval du barrage Gardiner	34
4. SOMMAIRE ET CONCLUSIONS	34
5. RÉFÉRENCES	42

Table des matières (suite)

	Page
ANNEXE A Aperçu du modèle d'analyse d'utilisation de l'eau (WUAM)	45
ANNEXE B Données sur l'écoulement naturel et l'écoulement à la frontière de l'Alberta et de la Saskatchewan	61
ANNEXE C Élément d'irrigation du modèle d'analyse d'utilisation de l'eau	73

Tableaux

1. Données sur l'utilisation de l'eau par secteur industriel durant l'année de référence	8
2. Coefficients d'utilisation de l'eau et populations urbaines et rurales pour l'année de référence	9
3. Importance du cheptel et coefficients d'utilisation de l'eau pour l'année de référence	9
4. Paramètres constants des données concernant les cultures	16
5. Paramètres mensuels des données sur les cultures	17
6. Paramètres des données pédologiques	17
7. Relation entre les zones irriguées et le réseau	17
8. Efficacité d'utilisation des précipitations et de l'absorption de l'irrigation	18
9. Répartition entre les cultures, les sols et l'irrigation	18
10. Scénario du cas de référence — zones d'irrigation et paramètres d'exploitation	18
11. Scénario de forte irrigation — zones d'irrigation et paramètres d'exploitation	19
12. Scénarios WUAM actuel et futur — zones d'irrigation par projets effectifs	19
13. Données sur l'évapotranspiration des cultures	21
14. Prévisions de prélèvement d'eau	21
15. Simulation de l'utilisation de l'eau à des fins d'irrigation par zone d'irrigation pour les scénarios du cas de référence	22
16. Simulation de l'utilisation de l'eau pour l'irrigation par zone d'irrigation pour les scénarios de forte irrigation	23
17. Simulation de l'utilisation de l'eau par noeud dans diverses conditions pour le scénario du cas de référence 2	23
18. Simulation de l'utilisation de l'eau par noeud dans diverses conditions pour le scénario 4 de forte irrigation	23
19. Niveaux du lac Diefenbaker pour le scénario 1 du cas de référence	30
20. Débits sortant du lac Diefenbaker pour le scénario 1 du cas de référence	30
21. Niveaux du lac Diefenbaker pour le scénario 2 du cas de référence	31
22. Débits sortant du lac Diefenbaker pour le scénario 2 du cas de référence	31
23. Niveaux du lac Diefenbaker pour le scénario 3 de forte irrigation	32
24. Débits sortant du lac Diefenbaker pour le scénario 3 de forte irrigation	32
25. Niveaux du lac Diefenbaker pour le scénario 4 de forte irrigation	33
26. Débits sortant du lac Diefenbaker pour le scénario 4 de forte irrigation	33
27. Fréquence des niveaux du lac Diefenbaker nécessaires à des usages récréatifs	34
28. Résumé des scénarios	40

Table des matières (suite)

Page

Illustrations

Figure 1.	Zone d'étude et stations de jaugeage	3
Figure 2.	Le réseau WUAM	6
Figure 3.	Courbe des niveaux optimaux et contraintes d'exploitation du réservoir du lac Diefenbaker	10
Figure 4.	Données sur les précipitations et l'évaporation brute pour le ruisseau Swift Current	11
Figure 5.	Exploitation observée et simulée du réservoir du lac Diefenbaker	12
Figure 6.	Répartition mensuelle du débit de la dérivation de Qu'Appelle pour les scénarios du cas de référence	13
Figure 7.	Données du scénario de croissance industrielle	14
Figure 8.	Données du scénario de croissance démographique	14
Figure 9.	Données du scénario de croissance du cheptel	15
Figure 10.	Données sur les précipitations ayant servi au calcul de l'eau utilisée pour l'irrigation	20
Figure 11.	Simulation de l'utilisation de l'eau à des fins d'irrigation pour les scénarios du cas de référence (précipitations 1912-1982)	24
Figure 12.	Simulation de l'utilisation de l'eau à des fins d'irrigation dans le cadre des scénarios de forte irrigation (précipitations 1912-1982)	24
Figure 13.	Prélèvements majeurs annuels moyens prévus pour le lac Diefenbaker	25
Figure 14.	Prélèvements majeurs annuels prévus pour le lac Diefenbaker dans des conditions extrêmement sèches et extrêmement pluvieuses	26
Figure 15.	Lac Diefenbaker — Combinaison des prélèvements dus à l'irrigation et à l'évaporation nette dans le cadre des scénarios de forte irrigation	27
Figure 16.	Niveaux moyens en fin de mois du lac Diefenbaker	27
Figure 17.	Niveaux du lac Diefenbaker au 30 juin	28
Figure 18.	Niveaux du lac Diefenbaker au 31 juillet	28
Figure 19.	Niveaux du lac Diefenbaker au 31 août	29
Figure 20.	Niveaux du lac Diefenbaker au 30 septembre	29
Figure 21.	Débits sortants mensuels moyens du lac Diefenbaker	35
Figure 22.	Débits sortants mensuels moyens en juin du lac Diefenbaker	35
Figure 23.	Débits sortants mensuels en juillet du lac Diefenbaker	36
Figure 24.	Débits sortants mensuels en août du lac Diefenbaker	36
Figure 25.	Débits sortants mensuels en septembre du lac Diefenbaker	37
Figure 26.	Niveaux moyens en fin de mois du lac Diefenbaker	37
Figure 27.	Niveaux du lac Diefenbaker en fin de mois pour le scénario 1	38
Figure 28.	Niveaux du lac Diefenbaker en fin de mois pour le scénario 2	38
Figure 29.	Niveaux du lac Diefenbaker en fin de mois pour le scénario 3	39
Figure 30.	Niveaux du lac Diefenbaker en fin de mois pour le scénario 4	39

Résumé

Ce rapport décrit une étude dont le but est d'expliquer l'application du modèle d'analyse d'utilisation de l'eau (WUAM) d'Environnement Canada à la partie du bassin hydrographique de la rivière Saskatchewan Sud qui se trouve sur le territoire de la Saskatchewan. Il porte principalement sur les caractéristiques d'application du modèle (besoins en données et préparation de celles-ci, élaboration des scénarios et modélisation) ainsi que sur l'analyse des résultats.

L'incidence sur les ressources en eau de quatre scénarios de développement différents a été examinée. Ces scénarios, qui par hypothèse se réalisent tous en l'an 2 000, dépeignent deux niveaux d'utilisation future de l'eau en Alberta et deux niveaux de développement de l'irrigation en Saskatchewan. Seule l'étendue irriguée en Saskatchewan a été modifiée, tous les autres paramètres d'irrigation étant censés demeurer constants. Le comportement du système a également été simulé dans le cadre d'une situation extrême où l'Alberta utiliserait 50 % de l'écoulement mensuel naturel des eaux.

Deux questions principales ont été mises en évidence dans l'analyse des résultats de la

simulation du WUAM : l'utilisation de l'eau à des fins d'irrigation en Saskatchewan et l'incidence des aménagements réalisés en Alberta et en Saskatchewan sur la valeur récréative du lac Diefenbaker ainsi que sur l'utilisation *in situ* du cours d'eau en aval. Les prélèvements d'eau destinée à l'irrigation (par noeud et périmètre d'irrigation ainsi que pour l'ensemble du bassin) et la consommation totale (irrigation, évaporation et dérivation) d'eau du lac Diefenbaker ont été analysés pour les divers scénarios, et l'on a présenté les fréquences auxquelles ces formes de consommation ont lieu.

L'étude a révélé que le lac n'atteindra les niveaux qui permettent de le consacrer à des usages récréatifs que de 21 % à 39 % du temps, selon le scénario. Par contre, en aval du barrage Gardiner, le débit sera toujours suffisant pour l'utilisation *in situ* du cours d'eau.

Ce rapport, qui ne présente qu'une seule application du WUAM, expose les avantages qu'offre le modèle en ce qui concerne les études de planification de l'aménagement des bassins hydrographiques. Il ne couvre pas l'intégralité des capacités du modèle.

Abstract

This is a report on a study intended to demonstrate the application of Environment Canada's Water Use Analysis Model (WUAM) on the Saskatchewan portion of the South Saskatchewan River basin. It focuses on the application aspects of the model (data requirements and preparation, scenario development, and model runs) and on the analysis of the results.

The water resources impact of four alternative development scenarios were investigated. The scenarios, all assumed to correspond to the year 2000, covered two levels of future water use in Alberta and two levels of irrigation development in Saskatchewan. Only the irrigated area in Saskatchewan was varied; all other irrigation parameters were assumed to remain constant. The system was also simulated under the extreme condition of Alberta's using 50% of the monthly natural streamflow.

Two primary issues were emphasized in the analysis of WUAM's simulation results:

irrigation water use in Saskatchewan and the impacts of developments in Alberta and in Saskatchewan on Lake Diefenbaker's recreational value and instream uses downstream. Irrigation water uses (by irrigation area, node, and basin total) and consumptive uses from Lake Diefenbaker (irrigation, evaporation, and diversion) were analyzed for the various scenarios and their frequencies of occurrence were presented.

The study showed that lake levels required for recreational uses will be satisfied only 21% to 39% of the time, depending on the scenario. Minimum flows required for instream uses below the Gardiner dam will always be satisfied.

This report presents only one application of WUAM and illustrates the advantages of the model in river basin planning studies. It does not cover the complete range of the model's capabilities.

Préface

Une version préliminaire de ce rapport a été produite en juillet 1987 et distribuée en Saskatchewan aux membres du conseil de l'Étude du bassin de la rivière Saskatchewan Sud, une étude fédérale-provinciale de planification des eaux lancée en mai 1986. Après une réflexion approfondie, le conseil a privilégié une façon différente d'analyser l'équilibre entre l'offre et la demande en eau, principalement afin de préserver la cohérence avec les méthodes employées en Alberta, la province où la rivière trouve sa source. Cette version du rapport, qui s'appuyait sur une étude effectuée dans le cadre du programme d'analyse de l'utilisation de l'eau d'Environnement Canada, n'a pas été financée en vertu de l'Étude du bassin de la rivière Saskatchewan Sud et ne faisait pas partie du travail technique réalisé pour celle-ci. Afin d'éviter de fournir des résultats qui ne confirmeraient pas ceux de l'Étude du bassin de la rivière Saskatchewan Sud, il a été décidé de ne pas publier l'étude d'Environnement Canada à ce moment.

Le modèle d'analyse d'utilisation de l'eau (WUAM) présente une façon relativement nouvelle d'aborder la modélisation de l'équilibre entre l'offre et la demande. En prenant les besoins en eau d'une zone d'étude comme point de départ de l'analyse, il s'écarte de la démarche plus traditionnelle suivie par les modèles précédents, et notamment celui qui a été employé dans le cadre de l'Étude du bassin de la rivière Saskatchewan Sud, qui se concentrent sur les apports en eau. Les auteurs estiment qu'il est maintenant justifié de publier le rapport de leur étude.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Tamas Hamory pour sa précieuse contribution à l'analyse des données et à la préparation des diverses illustrations. Il convient également de remercier Hans Foerstel, Jim Rogers et Derek Bjornback du bureau régional de Regina pour les révisions et commentaires constructifs qu'ils ont apportés à une version antérieure du rapport.

Démonstration du modèle d'analyse d'utilisation de l'eau (WUAM)

A.M. Kassem, D.M. Tate et P.A. Dossett

1. INTRODUCTION

1.1 Le modèle d'analyse d'utilisation de l'eau (WUAM)

Le modèle d'analyse d'utilisation de l'eau (WUAM) est un modèle de simulation informatique interactif extrêmement souple qui a principalement pour fonction de fournir des extrapolations de diverses formes d'utilisation de l'eau¹ dans un bassin versant. Le modèle compare également les usages prévus de l'eau avec les quantités disponibles et fournit, parmi de nombreux autres détails, des statistiques au sujet de la gravité et de la fréquence des pénuries d'eau, s'il y a lieu.

Le WUAM décrit un bassin hydrographique comme un réseau dendritique de noeuds (qui représentent les affluents ou les bassins versants secondaires) et de liens (correspondant au trajet que suivent les eaux entre les noeuds). Les prévisions concernant l'utilisation de l'eau ainsi que les calculs de bilan hydrologique sont effectués au palier des noeuds à des intervalles mensuels. Le modèle peut aussi tenir compte des quantités d'eau qui sont détournées de leur cours ainsi que de la répartition des eaux entre les administrations, analyser les répercussions de l'évolution du prix de l'eau sur son utilisation,

utiliser, modéliser le fonctionnement des réservoirs, tenir compte des priorités en matière d'utilisation de l'eau et aussi analyser le rationnement de l'eau et les restrictions imposées aux usages possibles dans les cas où la consommation s'approche de la quantité disponible ou même la dépasse.

Le WUAM examine séparément les divers usages de l'eau puis les aborde de manière intégrée. Ces usages se divisent en deux catégories : les utilisations qui supposent un prélèvement (ou consommation) et celles qui n'amènent pas de prélèvement (utilisation *in situ* du cours d'eau). Les usages de l'eau qui supposent un prélèvement sont eux-mêmes classés en six catégories principales : utilisation urbaine; utilisation rurale; utilisation industrielle; utilisation agricole (irrigation et abreuvement du bétail); production d'électricité; autres secteurs. Lorsqu'il y a lieu, il est possible de procéder à une ventilation de toutes les catégories d'utilisation de l'eau afin de parvenir à un niveau relativement précis de détail sectoriel. Deux grands paramètres d'utilisation de l'eau sont calculés. Le premier est la prise d'eau, qui est la quantité d'eau retirée pour un usage spécifique et dont une partie est restituée. Le deuxième est la consommation d'eau, qui correspond à la différence entre l'eau prélevée et la quantité restituée. Les utilisations de l'eau qui n'entraînent pas de prélèvements, par exemple les loisirs, la dilution des déchets, etc., sont traitées comme des contraintes s'exerçant sur l'écoulement qui obligent à maintenir un minimum de débit.

L'alimentation en eau est simulée en fonction des données de séries chronologiques de l'écoulement

¹ Dans ce rapport, on utilise l'expression générale «utilisation de l'eau» même dans les cas où une relation de prix (c.-à-d. la demande en eau) est mise en jeu. Cette expression est également employée lorsqu'il est nécessaire de regrouper sous un même terme divers paramètres comme la prise d'eau, les quantités brutes d'eau utilisées, la consommation, etc.

naturel² pour des points choisis du bassin versant. Un sous-élément de simulation de réservoir, qui est mis en application en conjonction avec les utilisations de l'eau, reproduit les effets de la régularisation sur les quantités d'eau disponibles. Il permet d'examiner les politiques d'exploitation d'un réservoir donné dans le contexte de l'utilisation qui est faite de l'eau à l'intérieur d'une région. Grâce à lui, il est de plus possible de faire en sorte que le réservoir exerce une fonction dynamique au sein d'un réseau afin de minimiser les pénuries d'eau lorsque cela est faisable.

Grâce à sa souplesse, le WUAM donne le moyen d'analyser pratiquement n'importe quel type de bassin hydrographique et convient bien à l'examen de toute une gamme d'hypothèses mettant en rapport l'usage qui est fait de l'eau dans différents secteurs avec des considérations économiques et sociales ainsi qu'avec le bilan hydrologique d'un bassin.

Même si l'on part du principe que le lecteur a une connaissance raisonnable du WUAM, le modèle est brièvement décrit dans son ensemble dans l'annexe A. On consultera Kassem (1992) pour plus de détails au sujet du WUAM.

1.2 Objectifs de l'étude

Cette étude, qui avait pour but de faire la démonstration de l'utilité du WUAM, a porté sur la partie du bassin de la rivière Saskatchewan Sud qui se trouve en Saskatchewan. Deux objectifs principaux étaient visés : d'une part établir l'intérêt du WUAM et montrer les résultats qu'il permet d'obtenir et, d'autre part, présenter des évaluations préliminaires tout d'abord des utilisations qui seront faites à l'avenir de l'eau dans la partie du bassin de la rivière

Saskatchewan Sud qui se trouve en Saskatchewan et ensuite des répercussions de ces utilisations, et de celles de l'Alberta, pour le lac Diefenbaker.

1.3 Portée de l'étude

La figure 1 indique quelle est la zone d'étude choisie pour la démonstration du WUAM. Cette zone correspond à la partie du bassin de la rivière Saskatchewan Sud qui se trouve en Saskatchewan entre la frontière de cette province et de l'Alberta et St. Louis. Deux barrages, ceux de Gardiner et de Qu'Appelle, qui ont donné naissance au lac Diefenbaker, régularisent le débit de la rivière Saskatchewan Sud et offrent la capacité de stockage dont on aura besoin pour poursuivre le développement en Saskatchewan. Le lac Diefenbaker fournit l'eau qui est nécessaire à l'irrigation, à la production d'électricité (centrale hydro-électrique de Coteau Creek et centrale thermique Queen Elizabeth), aux municipalités, à l'industrie, aux usages domestiques et à l'abreuvement du bétail tout en permettant de régulariser les crues et en se prêtant à des usages récréatifs. Dans le bassin, l'eau sert surtout, et de loin, à l'irrigation.

L'accroissement des besoins en eau dans la province qui est située en amont, c'est-à-dire l'Alberta, a fait baisser la quantité d'eau dont peut disposer la Saskatchewan. Un accord-cadre de répartition du débit conclu entre le Canada et les trois provinces des prairies (Alberta, Saskatchewan et Manitoba) réserve à la Saskatchewan un écoulement minimum spécifié ainsi qu'au moins la moitié de l'écoulement naturel annuel provenant de l'Alberta. Les prélèvements d'eau dans le lac Diefenbaker n'ont cessé de s'accroître, notamment dans le cadre d'une expansion des programmes d'irrigation.

Dans cette étude, la simulation n'a porté que sur la partie du bassin de la rivière Saskatchewan Sud qui se trouve en Saskatchewan. On a incorporé l'utilisation de l'eau en Alberta dans la simulation en attribuant les écoulements qui y correspondent

² L'écoulement est dit «naturel» lorsqu'il ne subit aucune modification, c'est-à-dire qu'il ne fait l'objet d'aucune régularisation et qu'il n'y a pas de prélèvement/consommation d'eau.

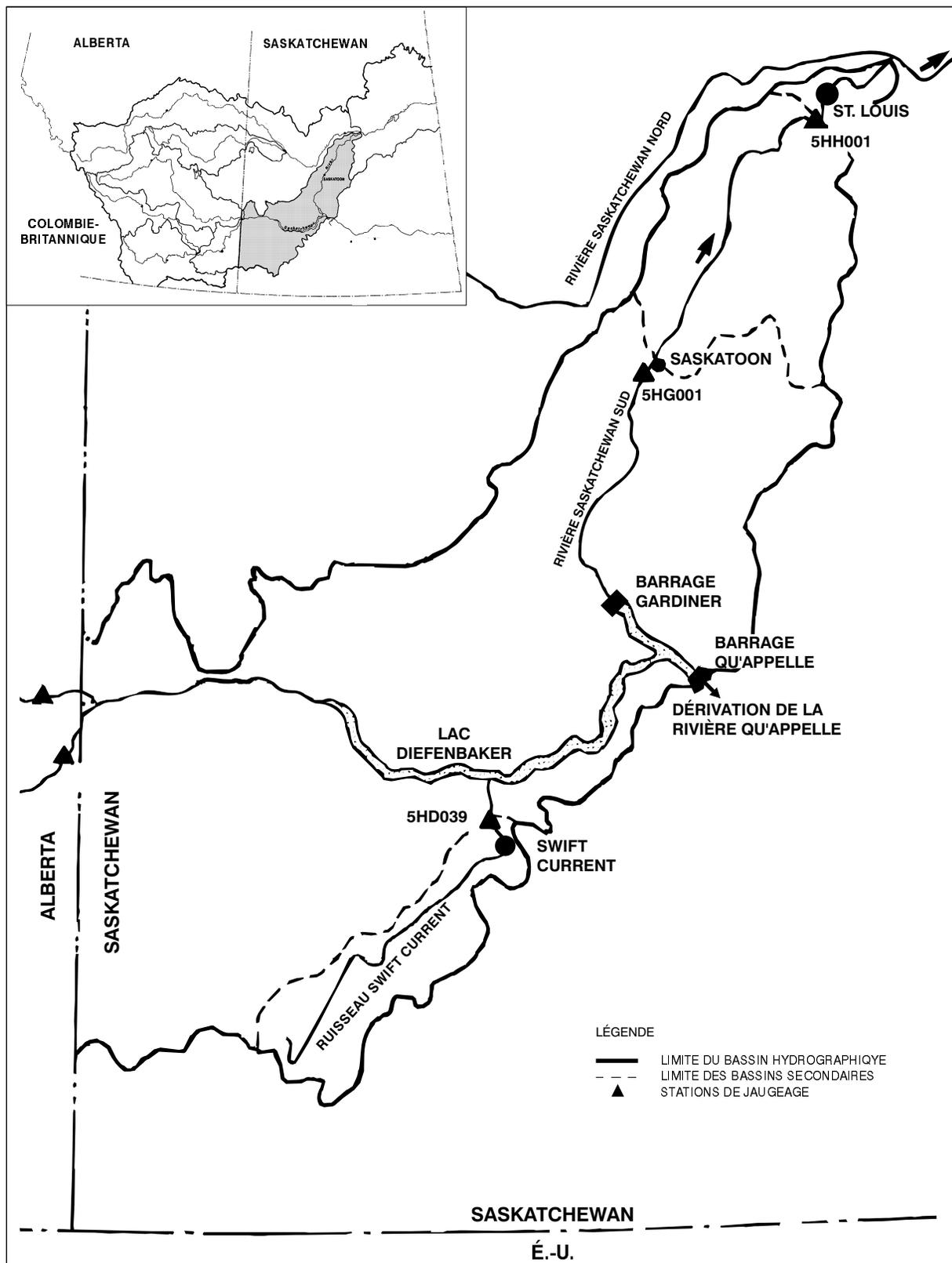


Figure 1. Zone d'étude et stations de jaugeage.

à un noeud hydrographique situé en Alberta à proximité immédiate de la frontière de cette province et de la Saskatchewan. Ces écoulements ont été déterminés sur la base d'enquêtes réalisées précédemment par le ministère de l'Environnement de l'Alberta (1984).

Les questions suivantes ont été abordées dans le cadre de l'étude :

- La consommation d'eau. Des prévisions de consommation ont été faites pour les principaux secteurs de consommation de l'eau dans le bassin : consommation industrielle, urbaine, rurale et enfin agricole (c.-à-d. pour l'irrigation et l'abreuvement du bétail).
- La variation dans le temps des quantités d'eau servant à l'irrigation. Les effets des seuls paramètres climatiques, les précipitations et l'évapotranspiration potentielle, sur les prélèvements destinés à l'irrigation ont été examinés afin d'illustrer les avantages du sous-modèle d'irrigation du WUAM.
- La consommation d'eau du lac Diefenbaker.
- L'utilisation du lac Diefenbaker pour les loisirs. L'étude a analysé les conséquences que peuvent avoir sur les niveaux du lac Diefenbaker à la fois les aménagements réalisés en Alberta et les usages qui sont faits de l'eau en Saskatchewan ainsi que les répercussions que cela entraîne sur l'intérêt que présente le lac du point de vue des loisirs. La Saskatchewan Water Corporation (1987) a imposé un niveau minimum de 555,3 m pour le réservoir en juillet et en août. Dans la présente étude, on a supposé qu'il faudrait maintenir des niveaux supérieurs à 555,3 m durant les mois qui vont de juin à septembre.
- Les utilisations *in situ* du cours d'eau même en aval du barrage Gardiner. On a supposé que des débits supérieurs à $42,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ devraient obligatoirement être maintenus dans

la rivière (Saskatchewan Water Corporation, 1987).

Les effets de la production hydro-électrique réalisée grâce au lac Diefenbaker n'ont pas été calculés dans le cadre de l'étude³.

L'incidence sur les ressources en eau de quatre scénarios distincts de développement a été examinée. Ces scénarios, qui sont tous censés correspondre à la situation prévalant en l'an 2 000, couvraient deux niveaux d'utilisation future de l'eau en Alberta et deux niveaux de développement de l'irrigation en Saskatchewan. De plus, le fonctionnement du système a été simulé dans une situation extrême où l'Alberta utiliserait 50 % de l'écoulement naturel mensuel. Il n'a pas été fait de simulation des conditions actuelles, principalement parce que l'on ne disposait pas, au moment où l'étude a été effectuée, des données sur les écoulements correspondants à la frontière de l'Alberta et de la Saskatchewan.

Deux périodes passées d'écoulement naturel ont servi de cadre aux simulations du bilan hydrologique. La première s'étale sur 28 ans (1928 à 1955), cette période relativement brève correspondant à celle pour laquelle des données ont été accumulées au sujet des écoulements à la frontière de l'Alberta et de la Saskatchewan. La deuxième période représente quant à elle 56 ans (1912 à 1967) d'écoulement naturel.

Il faut insister sur le fait que de nombreuses hypothèses ont dû être posées pour pouvoir effectuer les simulations. Dans une large mesure, les données propres à la courbe des niveaux

³ La capacité d'estimation des effets de la production hydro-électrique a été ajoutée ultérieurement au WUAM par l'intermédiaire d'un sous-modèle distinct, le sous-modèle d'utilisation de l'eau pour la production d'énergie électrique (SUEPEE). Ce sous-modèle, qui permet également de procéder à des estimations de l'utilisation de l'eau par les centrales thermiques, est expliqué par Acres International Ltd. (1987) et par Kassem (1992, annexe B).

optimaux ainsi qu'aux contraintes d'exploitation du lac Diefenbaker ont été fondées sur des estimations puisqu'il n'existe pas de données officielles. On n'a donc procédé qu'à un minimum de collecte de données. Les données sur les apports en eau et l'utilisation de celle-ci ont été dérivées à partir de la base de données qui avait été établie pour le modèle en ce qui concerne le bassin de la Saskatchewan. On s'est toutefois efforcé de n'intégrer que des données réalistes reflétant de façon raisonnable les apports en eau du bassin et les usages qui y sont faits de celle-ci. Il faudrait néanmoins considérer que les résultats de l'essai ont un caractère préliminaire ou expérimental au lieu de conclure qu'il s'agit d'une description achevée des apports en eau et des usages qui sont faits de celle-ci dans le bassin.

2. MISE EN PLACE DU MODÈLE POUR LE BASSIN DE LA RIVIÈRE SASKATCHEWAN SUD

Toutes les applications du WUAM passent par trois étapes principales :

- la division du bassin en bassins secondaires
- l'établissement d'une base de données pour le modèle
- l'élaboration et la mise à l'essai du scénario

Ces étapes sont décrites ci-après dans le cadre de leur application à la zone d'étude.

2.1 Zone d'étude et réseau WUAM

La zone d'étude couvrait la partie du bassin de la rivière Saskatchewan Sud qui est située entre la frontière de l'Alberta et de la Saskatchewan et St. Louis (figure 1). Cinq points d'étude (noeuds) ont été choisis pour la démonstration de l'application du WUAM. Le réseau WUAM de noeuds et de liens correspondant à cette zone est décrit dans la figure 2. Celle-ci montre également où se situent les zones d'irrigation à l'intérieur du réseau en ce qui concerne les noeuds d'apport et d'écoulement restitué. Afin de simplifier les choses, les programmes d'irrigation effectifs ont été groupés à l'intérieur des neuf zones d'irrigation indiquées

dans la figure 2. (La partie 2.3.2 fournit plus de détails à ce sujet.)

Un noeud fictif (ne correspondant pas à un véritable bassin secondaire) a été incorporé au réseau. Baptisé DUMMY01 et situé juste de l'autre côté de la frontière entre l'Alberta et la Saskatchewan, il représente les débits combinés des rivières Red Deer et Saskatchewan Sud. Ce noeud avait principalement pour fonction de permettre l'analyse de l'incidence que les aménagements réalisés en Alberta peuvent avoir sur les ressources en eau de la Saskatchewan et de simuler la répartition de l'écoulement entre les provinces.

2.2 Préparation des données

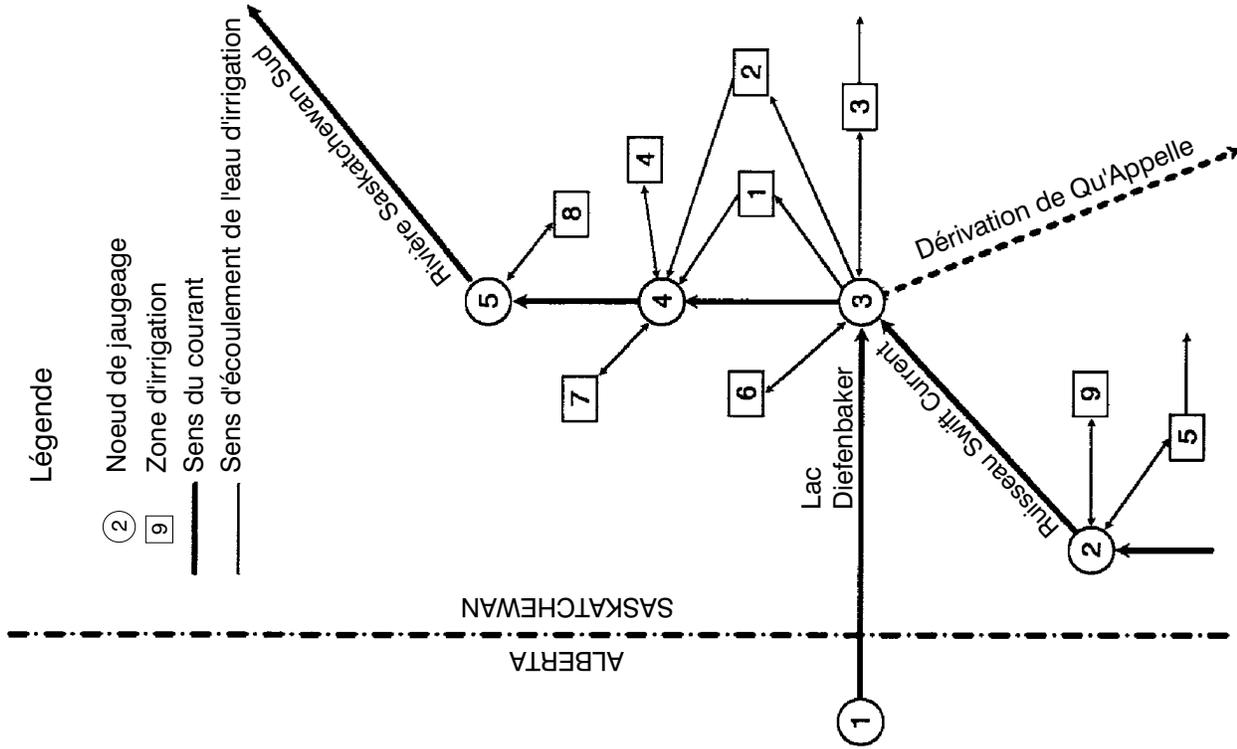
L'application du WUAM au bassin de la rivière Saskatchewan Sud nécessitait des données sur six domaines principaux :

- la consommation d'eau par l'industrie
- la consommation d'eau urbaine et rurale
- les utilisations agricoles de l'eau (irrigation et abreuvement du bétail)
- les apports en eau
- la répartition interprovinciale de l'écoulement
- le fonctionnement du réservoir du lac Diefenbaker

Il fallait également fournir au modèle de nombreuses données secondaires, notamment sur les utilisations prioritaires de l'eau, les prévisions de croissance économique et les conditions météorologiques (p. ex., précipitations et évapotranspiration, etc.). (Le tableau A.1 de l'annexe A donne une liste complète des données nécessaires au WUAM.)

2.2.1 Données sur la consommation d'eau de l'industrie

La base de données sur la consommation d'eau de l'industrie était composée des données sur la prise d'eau et la consommation de chacun des 30 secteurs industriels. (Ces secteurs correspondent de façon générale à ceux du système à deux chiffres de



Légende

- (2) Noeud de jaugeage
- (9) Zone d'irrigation
- Sens du courant
- Sens d'écoulement de l'eau d'irrigation

Noeuds du réseau

- N° Jauge
- 1 DUMMY01
 - 2 O5HD039
 - 3 DIFRES
 - 4 O5HG001
 - 5 O5HH001

Zones d'irrigation

N° Identification	Nom
1	SSR-ID
2	SSEWSS
3	SSRWUDA
4	SSRWUDB
5	SCCWUD
6	SSR-PIA
7	SSR-PIB
8	SSR-PIC
9	

Figure 2. Le réseau WUAM.

Classification type des industries de Statistique Canada.) Les données qui étaient nécessaires pour chacun des bassins secondaires de la zone d'étude ont été extraites pour 15 industries de l'Étude sur l'utilisation de l'eau dans l'industrie réalisée en 1981 par Environnement Canada (Tate et Scharf, 1985) et ont fait l'objet d'une estimation pour les autres secteurs. (Le tableau 1 fournit des données sur la consommation d'eau par l'industrie durant l'année de référence pour la zone d'étude.)

2.2.2 Données sur la consommation d'eau urbaine et rurale

Pour chaque noeud, les données sur la consommation d'eau urbaine (par les ménages, les entreprises et les institutions) ont été dérivées des études détaillées réalisées par Environnement Canada (Tate et Lacelle, 1987). Ces études portaient sur l'ensemble des municipalités de plus de 1000 habitants et fournissaient des informations très détaillées. Toutefois, du point de vue de l'application du WUAM, on ne s'intéressait qu'aux données sur la prise d'eau et la consommation urbaine. Le tableau 2 indique quelle est l'importance démographique des zones de consommation urbaine et rurale dans la zone d'étude en précisant quels sont les coefficients correspondants d'utilisation de l'eau. Des coefficients moyens ont été attribués à tous les noeuds.

2.2.3 Données sur les utilisations agricoles de l'eau

L'agriculture a besoin d'eau pour irriguer les cultures et abreuver le bétail. Les données sur l'irrigation sont examinées dans la partie 2.3.2. Celles qui concernent le cheptel ont été tirées des catalogues publiés sur la question et du recensement de 1981 de Statistique Canada. La majeure partie des données ont été obtenues par bassin secondaire grâce à un programme spécial d'extraction des données mis à exécution par Statistique Canada. Les données sur la prise et la consommation d'eau attribuables au bétail sont généralement constantes d'une région à l'autre, et l'on a donc appliqué des coefficients moyens nationaux. L'importance du

cheptel et les coefficients de consommation d'eau correspondants dont on s'est servi dans le cadre de l'étude sont précisés dans le tableau 3.

2.2.4 Données sur les apports en eau

Seuls les apports d'eau de surface, qui sont représentés dans le WUAM au moyen des données sur l'écoulement naturel mensuel à chaque noeud du bassin, ont été pris en considération. Les données sur l'écoulement naturel qui ont été utilisées pour la présente étude ont été dérivées par la Régie des eaux des provinces des Prairies (REPP). Les données couvraient la période qui va de 1912 à 1967, sauf pour l'écoulement à la frontière (noeud DUMMY01) pour lequel les données sur l'apport d'eau couvraient la période qui va de 1912 à 1982. (L'annexe B fournit des informations sur l'écoulement naturel aux divers noeuds.)

Même si le WUAM permet de tenir compte de l'utilisation des eaux souterraines, on ne disposait pas de données à ce sujet au moment où l'analyse a été effectuée. Par conséquent, on est parti du principe que l'intégralité des apports étaient constitués d'eau de surface.

2.2.5 Données sur la répartition interprovinciale

On a pris pour hypothèse que l'écoulement minimum devant franchir la frontière de l'Alberta et de la Saskatchewan (noeud DUMMY01) représentait la moitié des écoulements naturels de chaque mois de la période couverte par la simulation.

2.2.6 Données sur l'exploitation du réservoir du lac Diefenbaker

Les données sur l'exploitation du réservoir du lac Diefenbaker ont été extraites de rapports d'exploitation (Blain et Richards 1982a, 1982b, 1984a, 1984b) par Acres International Limited (1986). Ces rapports donnent également un certain aperçu des critères fondamentaux qui président aux méthodes d'exploitation.

Tableau 1

Données sur l'utilisation de l'eau par secteur industriel durant l'année de référence

N° de secteur	Nom du secteur	05HD039		05HG001		05HH001	
		Prélèvement (Mm³/an)	Consommation (%)	Prélèvement (Mm³/an)	Consommation (%)	Prélèvement (Mm³/an)	Consommation (%)
1	Agriculture	0,0000	0,0	0,0000	0,0	0,0000	0,0
2	Foresterie, etc,	0,0000	75,0	0,0008	75,0	0,0000	0,0
3	Mines de métaux	0,0000	0,0	0,0000	0,0	0,0000	0,0
4	Combustibles minéraux	0,0000	0,0	0,0000	0,0	0,0000	0,0
5	Mines non métalliques	0,0000	0,0	4,1767	20,7	0,0000	0,0
6	Aliments et boissons	0,2266	9,4	0,0000	0,0	1,7823	25,2
7	Tabac	0,0000	24,2	0,0000	24,2	0,0000	24,2
8	Caoutchouc et plastiques	0,0000	0,0	0,0000	0,0	0,0007	3,8
9	Cuir	0,0000	0,0	0,0000	0,0	0,0019	0,0
10	Textiles	0,0000	0,0	0,0000	0,0	0,0000	0,0
11	Bois	0,0000	0,0	0,0000	0,0	0,0000	0,0
12	Mobilier	0,0131	0,0	0,0558	0,0	0,0000	0,0
13	Papier	0,0000	0,0	0,0000	0,0	0,0005	2,9
14	Imprimerie	0,0014	2,9	0,0180	2,9	0,0001	9,7
15	Métaux primaires—fer	0,0000	0,0	0,0000	0,0	0,0000	4,4
16	Métaux primaires—autres	0,0000	4,4	0,2738	4,4	0,0016	0,0
17	Métallurgie	0,0000	0,0	0,0000	0,0	0,0396	3,4
18	Machines-outils	0,0552	3,4	0,2622	3,4	0,0023	1,0
19	Matériel de transport	0,0000	0,0	0,0000	0,0	0,0000	3,3
20	Matériel électrique	0,0228	3,3	0,1599	3,3	0,0364	78,7
21	Minéraux non métalliques	0,0000	0,0	0,0000	0,0	0,0000	0,0
22	Pétrole et charbon	0,0000	0,0	0,0000	0,0	0,5736	57,5
23	Produits chimiques	0,0000	0,0	0,4480	99,4	0,0000	8,6
24	Produits manufacturiers divers	0,0104	8,6	0,0983	8,6	0,0000	0,0
25	Construction	0,0000	0,0	0,0000	0,0	0,0000	0,0
26	Transports	0,0000	0,0	0,0000	0,0	133,0668	0,4
27	Énergie électrique	0,0000	0,0	0,0000	0,0	0,0000	0,0
28	Autres services publics	0,0000	0,0	0,0000	0,0	0,0000	0,0
29	Commerce	0,0000	0,0	0,0000	0,0	0,0000	0,0
30	Autres	0,0000	0,0	0,0000	0,0	0,0000	0,0

Tableau 2

Coefficients d'utilisation de l'eau et populations urbaines et rurales pour l'année de référence

	05HD039	05HG001	05HH001	Population totale	Coefficients d'utilisation de l'eau	
					Prélèvement (L/j par personne)	Consommation (%)
Urbaines	16 859	162 272	7 172	186 303	463	20
Rurales	4 659	40 320	23 501	68 480	137	70
Total	21 518	202 592	30 673	254 783		

Tableau 3

Importance du cheptel et coefficients d'utilisation de l'eau pour l'année de référence

	05HD039	05HG001	05HH001	Population totale	Coefficients d'utilisation de l'eau	
					Prélèvement (L/j par personne)	Consumption (%)
Bovins à viande	41 000	350 000	65 000	456 000	20,4	90
Bovins laitiers	2 000	13 000	2 000	17 000	54,0	70
Chevaux	1 000	9 000	2 000	12 000	68,0	70
Porcs	10 000	85 000	45 000	140 000	6,0	70
Moutons	4 000	23 000	3 000	30 000	3,5	95
Volaille	37 000	836 000	283 000	1 156 000	0,3	95

La figure 3 décrit la courbe des niveaux optimaux et les contraintes d'exploitation qui ont été établies pour le lac Diefenbaker. Les contraintes physiques et d'exploitation se résument comme suit :

- Le niveau maximum admissible pour le réservoir (c.-à-d. lorsqu'il est rempli à pleine capacité) est de 556,87 m.
- Le niveau minimum admissible pour le réservoir (qui est fonction du niveau de l'enrochement) est de 545,60 m.
- Le débit minimum mensuel évacué de la retenue (du fait de l'écoulement minimum nécessaire à Saskatoon) s'établit à $42,50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.
- La superficie du réservoir et les quantités d'eau retenues à différents niveaux sont énumérées ci-après :

Niveau (m)	Superficie (km ²)	Volume (Mm ³)
535	180	2 850
540	240	4 000
545	265	5 250
550	328	6 700
555	404	8 550
560	472	10 750

L'évaporation nette a été calculée sur la base des données concernant les précipitations et l'évaporation brute à Swift Current Creek entre 1912 et 1967 (figure 4).

Les niveaux maximum et minimum mensuels souhaitables pour la retenue ont été estimés d'après la manière dont le réservoir a

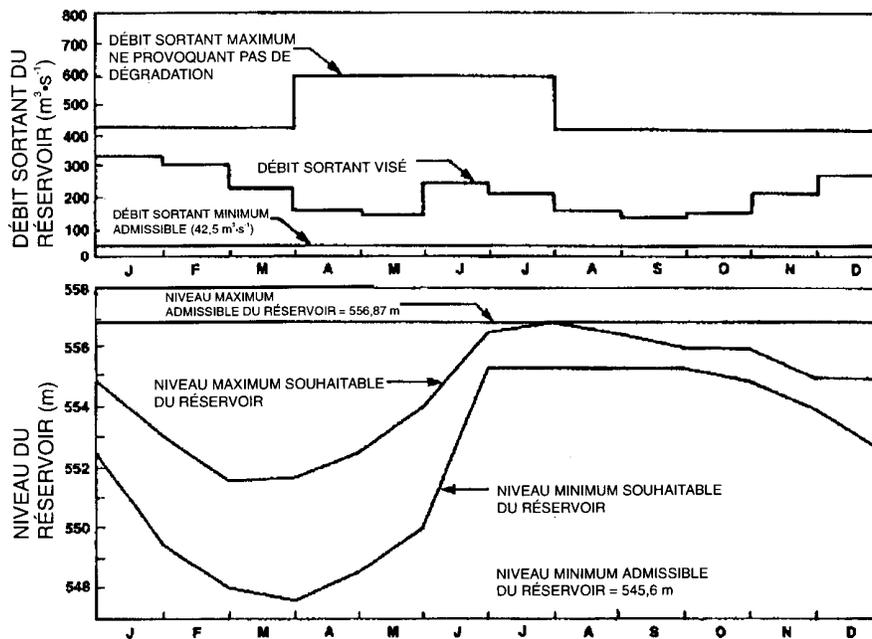


Figure 3. Courbe des niveaux et contraintes d'exploitation du réservoir du lac Diefenbaker

été exploité entre 1979 et 1982 (Blain et Richards 1982a, 1982b, 1984a, 1984b). On a supposé qu'il fallait maintenir des niveaux supérieurs à 555,3 m de juin à septembre pour faciliter les activités récréatives. Les niveaux à conserver durant les autres mois dépendaient principalement de méthodes d'exploitation conçues à la fois pour protéger les régions situées en aval des inondations et permettre une production hydro-électrique.

Les quantités maximum d'eau qu'il est possible d'évacuer de la retenue sans entraîner de dégradation en aval varient durant l'année. Durant les périodes où l'on ne s'attend pas à des inondations, cette quantité est fixée à $425,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, ce qui correspond à la capacité de la turbine. Durant les périodes de grande crue, comme en 1981 (Blain et Richards, 1984a), il semble que l'on ait limité dans toute la mesure du possible les quantités totales d'eau évacuée de la retenue à $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ afin d'éviter les inondations en aval.

La sélection d'objectifs d'évacuation revêt la plus grande importance du point de vue de la

validité de la modélisation du réservoir puisque, pour l'essentiel, l'évacuation de l'eau représente la force vive de ce dernier. Les objectifs d'évacuation énumérés dans la figure 3 correspondent aux quantités moyennes mensuelles à long terme qui ont été relâchées. Il faut remarquer que, durant les années de sécheresse, ces objectifs seront trop importants et que le niveau de la retenue tendra à s'approcher du niveau minimum souhaitable. Les années pluvieuses, c'est le contraire qui se produira, les niveaux de la retenue s'élevant vers le niveau maximum souhaitable. Par conséquent, il faut s'attendre à ce que le modèle fasse apparaître une plus forte variabilité interannuelle des niveaux du réservoir que dans la réalité, où les objectifs d'évacuation sont constamment ajustés dans le cadre d'une exploitation prudente.

Afin de pouvoir évaluer le rendement du sous-modèle du réservoir sur la base de la courbe des niveaux optimaux et des contraintes d'exploitation spécifiques au lac Diefenbaker, le fonctionnement du système a été simulé pour la période qui va de janvier 1979 à décembre 1982.

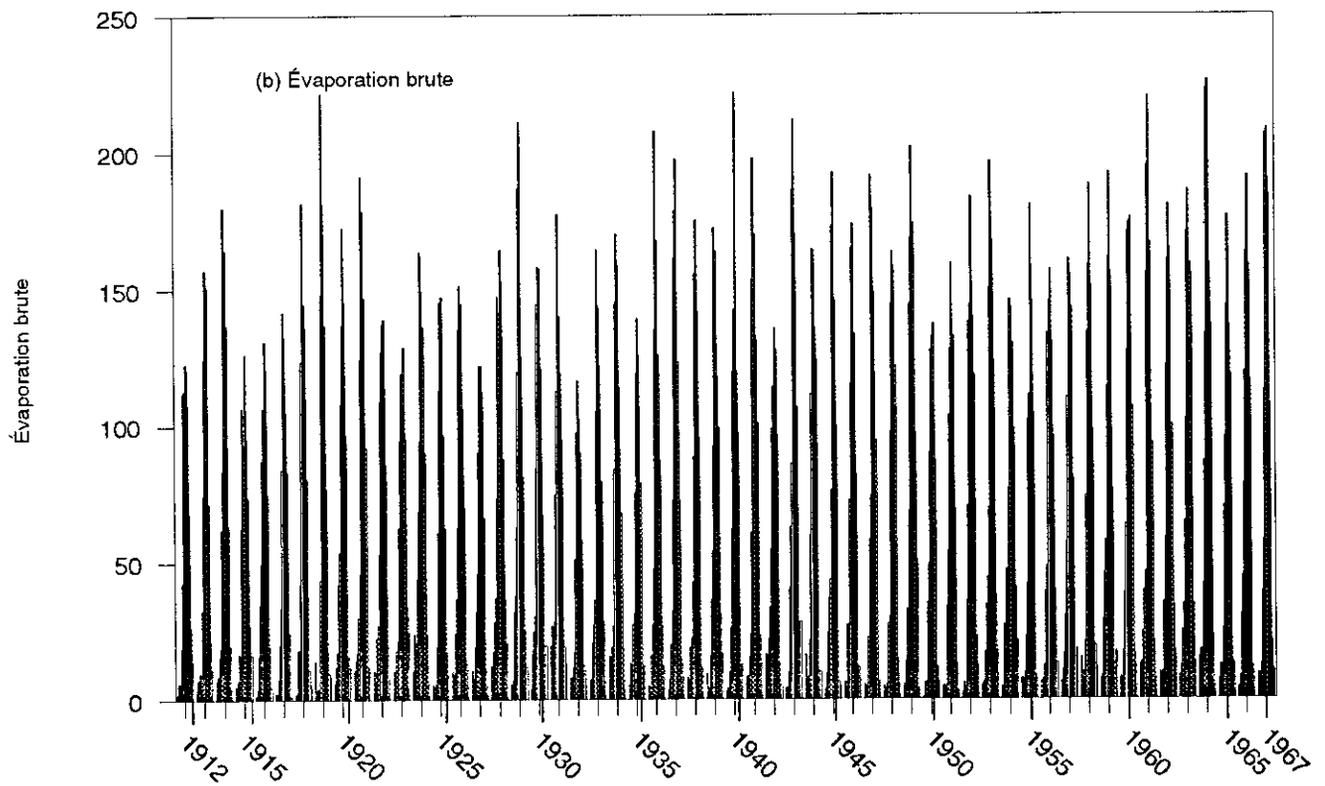
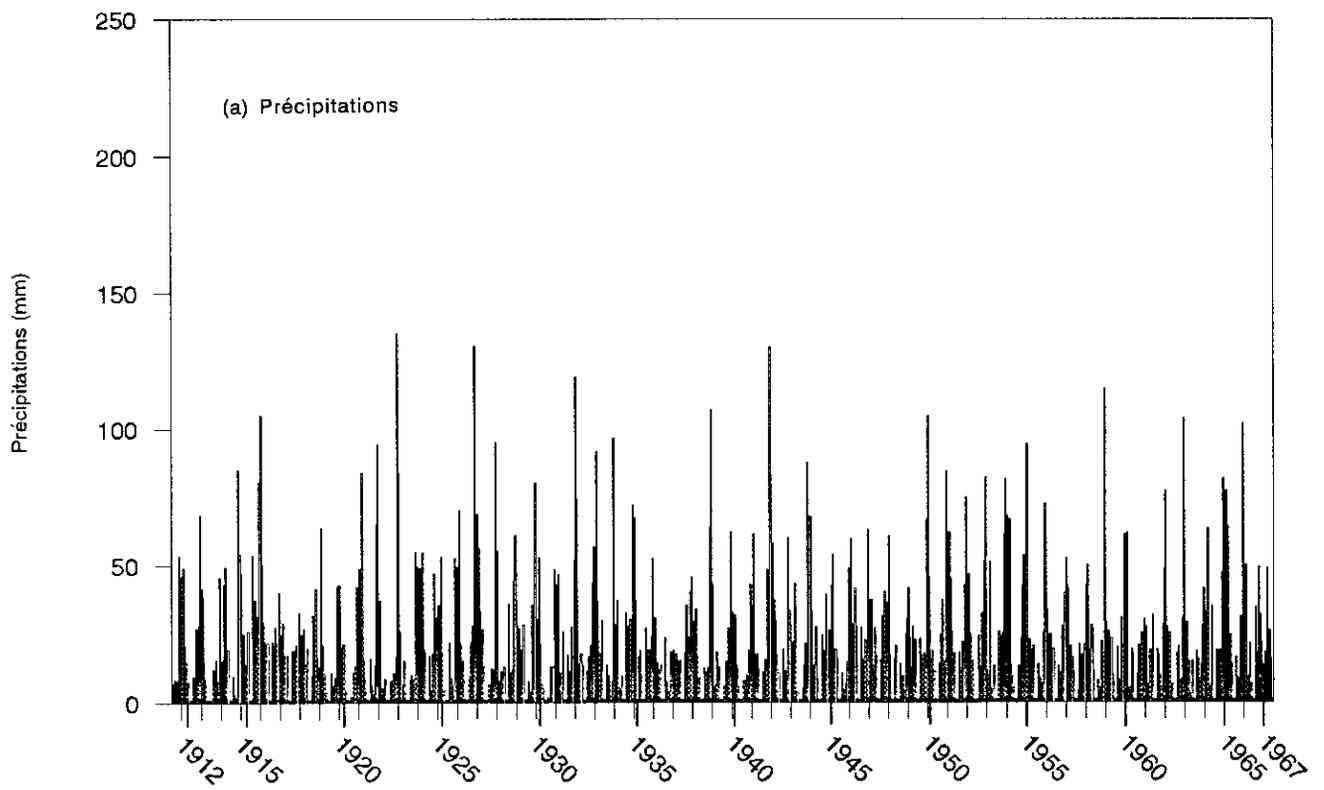
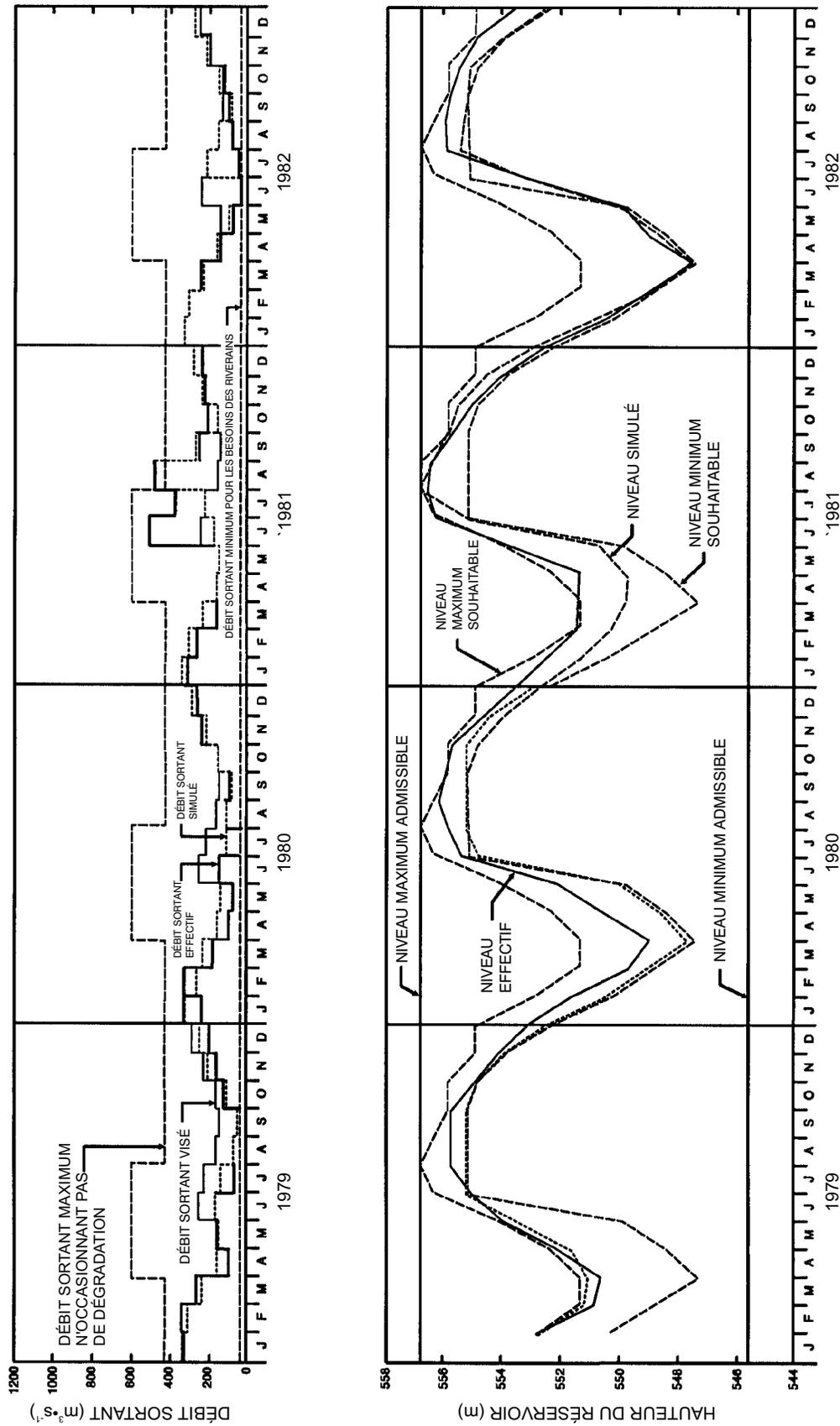


Figure 4. Données sur les précipitations et l'évaporation brute pour le ruisseau Swift Current.



Source : Acres International Limited (1986).

Figure 5. Exploitation observée et simulée du réservoir du lac Diefenbaker.

Le ministère de l'Environnement de la Saskatchewan (Blain et Richards, 1982a, 1982b, 1984a, 1984b) a mesuré les niveaux du réservoir et les quantités d'eau évacuées de celui-ci durant cette période. Pour cette évaluation, les données sur les apports d'eau dans la retenue, qui ont été fournies par le ministère de l'Environnement de la Saskatchewan, ont été ajustées afin de tenir compte de l'évaporation. Une comparaison des quantités d'eau évacuées et des niveaux de la retenue qui ont été calculés par simulation avec les valeurs effectivement relevées montre que la simulation donne une image raisonnablement exacte de la situation qui prévaut réellement dans le réservoir (figure 5). Cependant, de façon générale, le sous-modèle du réservoir du WUAM faisait baisser le niveau de la retenue au-delà de ce qui a été observé. Cela tient principalement au fait que l'objectif d'écoulement est demeuré le même pour toutes les années, qu'il y ait eu ou non des périodes de sécheresse, alors qu'en réalité l'administration du réservoir a ajusté les quantités évacuées en fonction des apports prévus.

2.3 Scénarios d'application

Quatre scénarios expérimentaux, qui sont tous censés correspondre à l'an 2 000, ont été mis à l'épreuve pour la partie du bassin de la rivière Saskatchewan Sud qui est située en Saskatchewan :

- Scénario 1 : Cas de référence — Alberta et Saskatchewan
- Scénario 2 : Cas de référence — l'écoulement provenant de l'Alberta est limité à la quantité prévue dans la répartition
- Scénario 3 : Forte irrigation — Alberta et Saskatchewan
- Scénario 4 : Forte irrigation — l'écoulement provenant de l'Alberta est limité à la quantité prévue dans la répartition

Les scénarios 1 et 2 sont identiques sauf en ce qui concerne les écoulements à la frontière de l'Alberta et de la Saskatchewan. Dans le scénario 1, les débits provenant de l'Alberta ont été indiqués par le ministère de l'Environnement de l'Alberta et correspondent à l'application 1A (Alberta Environment, 1984). Dans le scénario 2, on a

supposé que les écoulements à la frontière correspondaient à ceux que prévoit la répartition (c.-à-d. 50 % des écoulements mensuels naturels à la frontière). Pour ces deux scénarios, on est parti du principe que la dérivation de Qu'Appelle recevait 187,3 Mm³ annuellement (c.-à-d. moyenne 5,9 m³·s⁻¹), cette quantité étant répartie durant l'année (figure 6).

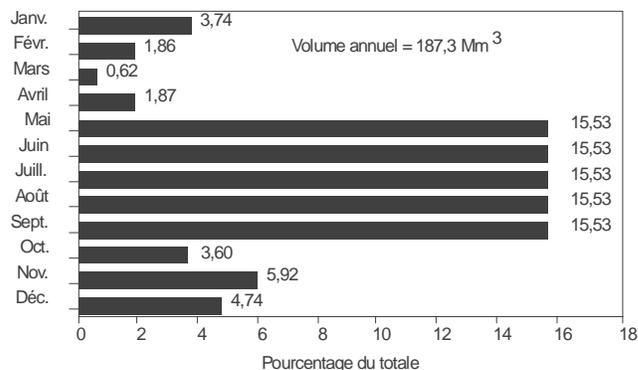
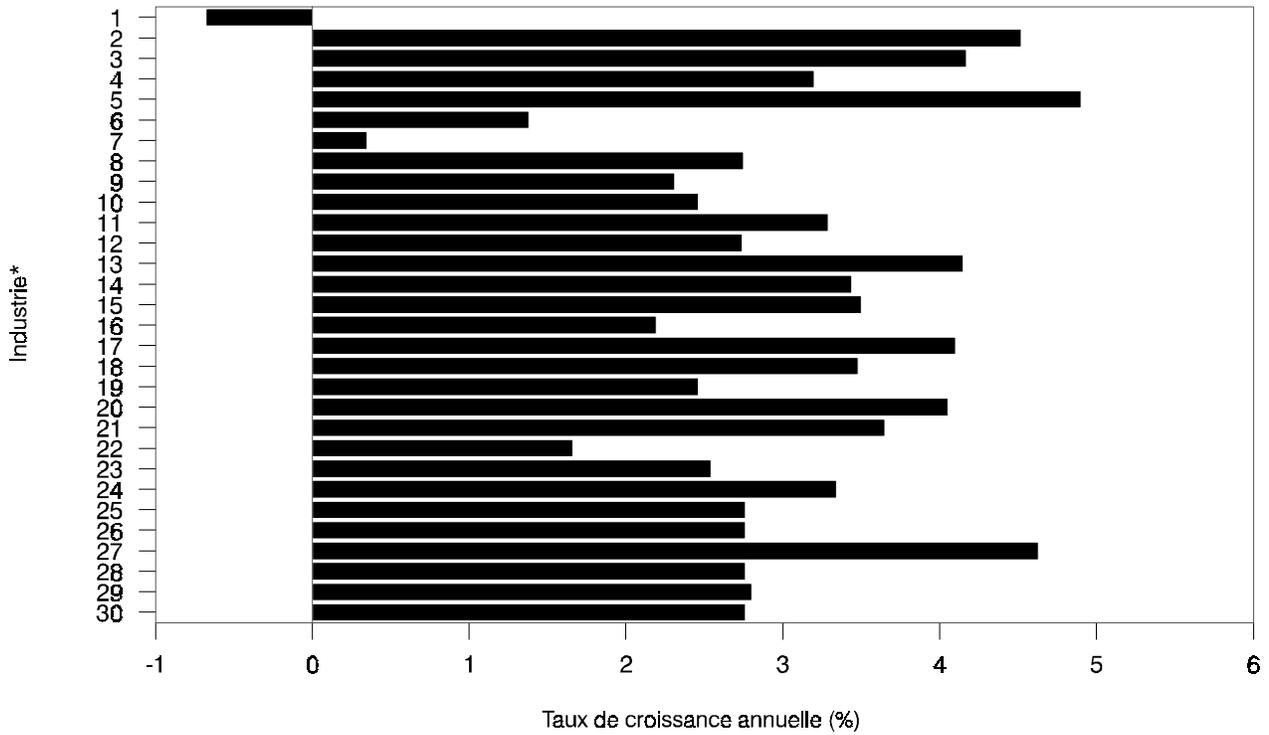


Figure 6. Répartition mensuelle du débit de la dérivation de Qu'Appelle pour les scénarios du cas de référence

Pareillement, ce sont les écoulements à la frontière qui constituent la seule différence entre les scénarios 3 et 4. Dans le scénario 3, les débits provenant de l'Alberta correspondent à une forte irrigation en Alberta (Application 4C, Alberta Environment, 1984). On a supposé que les écoulements à la frontière pour le scénario 4 correspondaient à ceux que prévoit la répartition (comme dans le scénario 2). On est parti du principe que la dérivation de Qu'Appelle pour ces deux scénarios recevait 346,8 Mm³ (soit 11 m³·s⁻¹), cette quantité étant uniformément répartie durant l'année.

2.3.1 Hypothèses de croissance

Des hypothèses ont été posées au sujet de la croissance de l'industrie (figure 7), de la population (figure 8) et du cheptel (figure 9) dans tous les scénarios d'application. On est



*Les chiffres correspondent aux secteurs industriels énumérés dans le tableau 1.

Figure 7. Données du scénario de croissance industrielle.

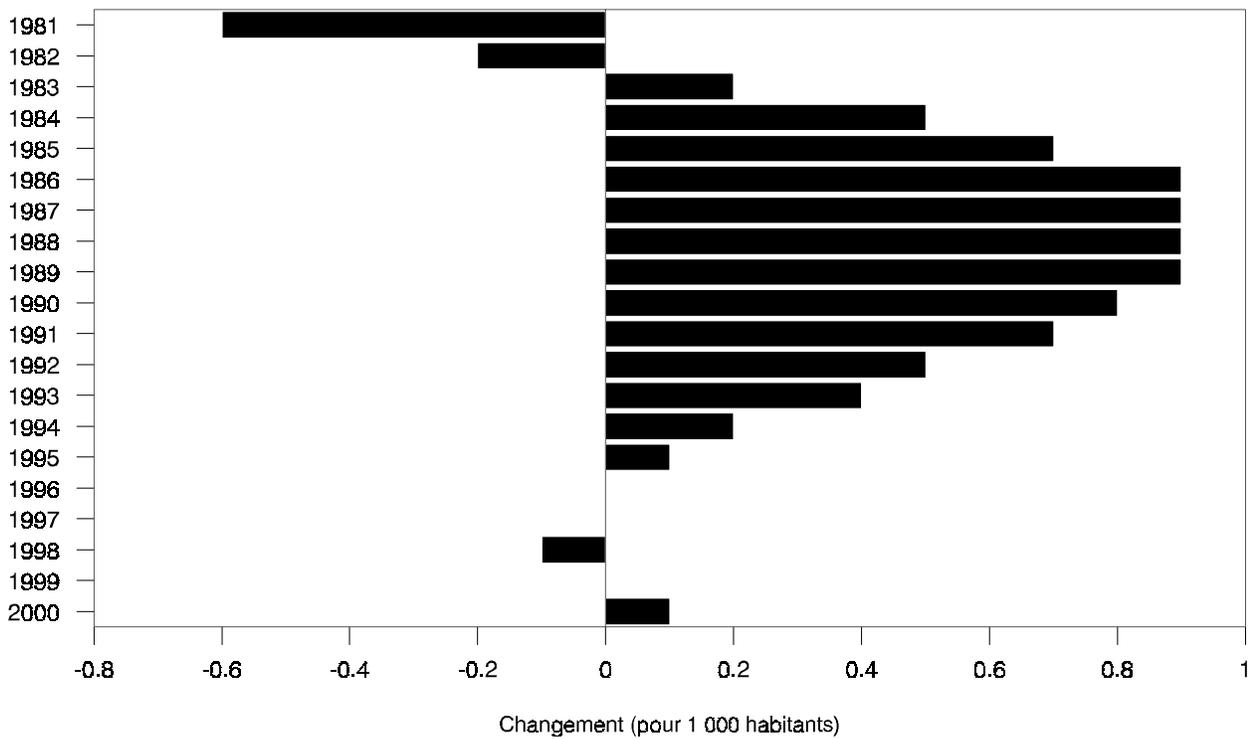


Figure 8. Données du scénario de croissance démographique.

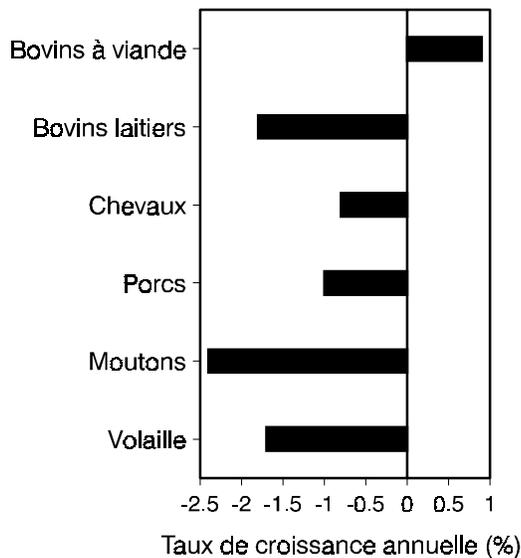


Figure 9. Données du scénario de croissance du cheptel.

parti du principe que les taux de croissance régionaux de l'industrie étaient également valables pour tous les bassins secondaires de la zone d'étude. (Les taux de croissance annuelle des 30 secteurs industriels [figure 7] représentent des moyennes régionales pour la période de prévision et correspondent à des extrapolations élaborées par le Conseil économique du Canada pour la période qui va de 1981 à 1999 [communications personnelles].) Les taux annuels de croissance démographique pour la période qui va de 1981 à l'an 2 000 (figure 8) reprennent les prévisions de Statistique Canada. On a supposé que le taux de croissance démographique des bassins secondaires était identique à celui de la province et également que la consommation d'eau urbaine par habitant de l'année de référence ne changeait pas les années suivantes.

2.3.2 Données du scénario de développement de l'irrigation

À l'inverse de ce qui est le cas pour les autres formes d'utilisation de l'eau, la consommation due à l'irrigation peut varier fortement d'une année à l'autre sous l'influence de facteurs physiques, climatiques, économiques, sociaux et politiques. Les facteurs physiques comprennent la superficie irriguée, le type et la composition des cultures ainsi que les méthodes

d'irrigation, l'intensité de celle-ci et son efficacité. Les facteurs climatiques sont dominés par les précipitations et l'évapotranspiration potentielle. Le coût de l'irrigation influe sur la mesure dans laquelle des changements physiques sont apportés alors que les facteurs sociaux et politiques peuvent prévaloir sur les autres facteurs.

Le sous-modèle d'irrigation permet de faire varier les paramètres physiques énumérés ci-après, soit individuellement, soit dans une quelconque combinaison :

- superficie irriguée
- type/composition des cultures
- composition des méthodes d'irrigation
- type de sol
- efficacité de l'acheminement de l'eau
- efficacité de l'irrigation
- niveau d'irrigation⁴ par type de culture et de méthode d'irrigation
- salinité des eaux d'irrigation

La mesure dans laquelle l'irrigation est pratiquée dépend fortement des variations du climat. Les variations annuelles des précipitations peuvent être très importantes et constituent le principal facteur qui conditionne l'évaluation de la consommation d'eau attribuable à l'irrigation. L'évapotranspiration potentielle peut elle aussi varier d'une année sur l'autre. Le sous-modèle d'irrigation évalue les quantités d'eau qui sont consommées à cette fin année par année et mois par mois sur la base des données sur les précipitations et l'évapotranspiration potentielle qui ont été recueillies les années précédentes.

L'annexe C décrit le sous-modèle d'irrigation. Nous présentons ci-après les hypothèses posées spécifiquement au sujet du

⁴Le niveau d'irrigation est une fraction de l'irrigation optimale. Cette dernière correspond à la quantité d'eau qui est répandue pour préserver les niveaux optimaux d'humidité du sol qui permettent d'atteindre le rendement potentiel maximum des cultures.

développement de l'irrigation ainsi que les paramètres ayant servi à l'estimation des quantités d'eau nécessaires à l'irrigation.

Nous avons considéré que trois cultures sont typiques de la gamme de celles qui sont pratiquées dans la zone d'étude : le blé, pour représenter les céréales; la luzerne, pour le fourrage; les pommes de terre, pour les cultures spéciales. Les tableaux 4 et 5 présentent les paramètres qui correspondent aux différentes cultures. On est parti du principe que la saison de culture s'étalait sur cinq mois, de mai à septembre.

On a estimé que quatre types de sols sont représentatifs de la gamme de ceux que l'on retrouve dans la zone d'étude : les sols légers, moyens, moyens-lourds et lourds. Le tableau 6 précise les paramètres pédologiques.

Tableau 4

Paramètres constants des données concernant les cultures

	Grains	Fourrage	Cultures spéciales
Fraction de diminution minimum optimale	0,150	0,150	0,000
Fraction de diminution maximum optimale	0,600	0,700	0,250
Constante A de l'équation de diminution	1,309	1,309	0,854
Constante B de l'équation de diminution	-0,602	-0,602	-0,677
Profondeur maximum de la rhizosphère (m)	1,200	1,500	0,600
Salinité maximum du sol pour un rendement de 90 % (mmho-cm ⁻¹)	7,400	3,400	2,500
Salinité maximum du sol pour un rendement de 0 % (mmho-cm ⁻¹)	20,000	15,500	10,000
Fraction de diminution lorsque la fraction ET = 0,95	0,700	0,750	0,600
Fraction de diminution lorsque la fraction ET = 0,10	0,930	0,950	0,600
Fraction de diminution lorsque la fraction ET = 0,80	0,830	0,900	0,720

*Évapotranspiration

Le tableau 7 décrit les zones d'irrigation et la place qu'elles occupent à l'intérieur du bassin versant du point de vue des apports d'eau et de l'écoulement restitué. Les tableaux 8 à 11 récapitulent les données sur l'irrigation par zone d'irrigation.

Dans le cadre de l'étude, la superficie irriguée représente le seul paramètre que l'on ait laissé varier dans les scénarios examinés. On est parti du principe que tous les autres demeuraient inchangés. L'attribution de valeurs différentes à ces paramètres pourrait notablement modifier les résultats de l'analyse. Le tableau 12 ventile par projet les données du scénario d'irrigation du WUAM (zone irriguée). On a supposé que les zones irriguées du bassin versant couvraient respectivement, dans le cadre des scénarios du cas de référence de l'an 2 000 et du cas de forte irrigation, des superficies de 76 300 et 142 600 ha.

On a considéré qu'un niveau d'irrigation relativement élevé de 60 % s'appliquerait à l'ensemble des cultures dans les conditions qui régneront à l'avenir. Actuellement, ce niveau se situe probablement aux alentours de 50 % (Pohjakas, 1981).

La figure 10 présente les données sur les précipitations qui sont utilisées dans le cadre de l'étude. Les données sur la moyenne mensuelle de l'évapotranspiration potentielle de référence (Hobbs et Krogman, 1983), qui ont été recueillies à Vauxhall, en Alberta, ont été employées pour toutes les zones d'irrigation. Les données sont présentées dans le tableau 13, avec les facteurs de culture correspondants.

2.3.3 Période de simulation

La période de simulation du bilan hydrologique couverte par le WUAM est fonction des périodes antérieures les plus brèves pour lesquelles on dispose de données sur les précipitations, l'évaporation, l'écoulement naturel et l'écoulement à la frontière, ces données ayant été incorporées à la base de données. Les simulations actuelles couvrent les

Tableau 5
Paramètres mensuels des données sur les cultures

	Facteurs mensuels des cultures			Facteurs d'ajustement de diminution			Facteurs d'ajustement pour la profondeur de la rhizosphère			Facteurs d'ajustement pour la salinité des sols		
	Grains	Cultures		Grains	Cultures		Grains	Fourrage	Cultures spéciales	Grains	Fourrage	Cultures spéciales
		Fourrage	spéciales		Fourrage	spéciales						
Janv.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Févr.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mars	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Avril	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mai	0,25	0,80	0,29	0,80	1,00	1,00	0,22	1,00	0,31	0,60	1,00	1,00
Juin	0,82	0,94	0,64	1,00	1,00	0,90	0,64	1,00	0,70	1,00	1,00	1,00
Juillet	1,11	0,95	0,89	1,00	1,00	0,90	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Août	0,47	0,83	0,92	1,20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Sept.	0,25	0,73	0,52	1,00	1,00	1,10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Oct.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nov.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Déc.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tableau 6
Paramètres des données pédologiques

Type de sol	Réserve en eau utile (mm/m)	Efficacité du lessivage (%)	Efficacité de la percolation (%)
Léger	60,0	90,0	40,0
Moyen	140,0	70,0	20,0
Moyen-lour	170,0	55,0	15,0
Lourd	200,0	40,0	10,0

Tableau 7
Relation entre les zones irriguées et le réseau

Zone d'irrigation	Noeuds du bassin secondaire						Stations de mesure des précipitations
	Noeuds d'apport en eau	Noeuds de l'écoulement restitué					
		N°	Identification	Pourcentage d'écoulement restitué	N°	Pourcentage d'écoulement restitué	
1	SSR-ID	3	4	100		SWFTSAS*	
2	SSEWSS	3	4	100		SWFTSAS	
3	SSRWUDA	3	3	100†		SWFTSAS	
4	SSRWUDB	4	4	100		SWFTSAS	
5	SCCWUD	2	2	20	0‡	80	SWIFT§
6	SSR-PIA	3	3	100		SWFTSAS	
7	SSR-PIB	4	4	100		SWFTSAS	
8	SSR-PIC	5	5	100		SWFTSAS	
9	SCC-PI	2	2	100		SWIFT	

*Moyenne à Swift Current et Saskatoon

†Variera en fonction du niveau de développement

‡Écoulement restitué en dehors des limites du bassin

§Swift Current

Tableau 8

Efficacité d'utilisation des précipitations et de l'absorption de l'irrigation

Zone d'irrigation		Efficacité d'absorption des précipitations (%)	Efficacité d'absorption de l'irrigation (%)			
N°	Identification		Rigoles	Planches et levés	Rampe à déplacement parallèle	Arroseurs rotatifs
1	SSR-ID	100	55	60	70	80
2	SSEWSS	100	55	60	70	80
3	SSRWUDA	100	55	60	70	80
4	SSRWUDA	100	55	60	70	80
5	SCCWUD	100	55	60	70	80
6	SSR-PIA	100	55	60	70	80
7	SSR-PIB	100	55	60	70	80
8	SSR-PIC	100	55	60	70	80
9	SCC-PI	100	55	60	70	80

Tableau 9

Répartition entre les cultures, les sols et l'irrigation

Zone d'irrigation		Cultures (% de la zone)			Sols (% de la zone)				Irrigation (% de la zone)			
N°	Identification	Grains	Fourrage	Cultures spéciales	Léger	Moyen-lourd	Moyen-lourd	Lourd	Rigoles	Planches et levés	Rampe à déplacement parallèle	Arroseurs rotatifs
1	SSR-ID	77,7	17,9	4,4	-	50	50	-	17	17	16	50
2	SSEWSS	65,0	25,0	10,0	-	50	50	-	10	10	40	40
3	SSRWUDA	40,0	55,0	5,0	-	50	50	-	0	20	50	50
4	SSRWUDB	40,0	55,0	5,0	-	50	50	-	0	20	50	50
5	SCCWUD	25,0	65,0	10,0	-	50	50	-	25	25	25	25
6	SSR-PIA	45,0	45,0	10,0	-	50	50	-	10	10	40	40
7	SSR-PIB	45,0	45,0	10,0	-	50	50	-	10	10	40	40
8	SSR-PIC	45,0	45,0	10,0	-	50	50	-	10	10	40	40
9	SCC-PI	25,0	65,0	10,0	-	50	50	-	10	10	40	40

Tableau 10

Scénario du cas de référence — zones d'irrigation et paramètres d'exploitation

Zone d'irrigation		Zone irriguée (ha)	Niveau d'irrigation des cultures (%)			Efficacité de l'apport (%)	Pertes dues à l'évaporation (%)
N°	Identification		Grains	Fourrage	Cultures spéciales		
1	SSR-ID	22 000	60	60	60	85	35
2	SSEWSS	8 900	60	60	60	85	35
3	SSRWUDA	15 100	60	60	60	85	15
4	SSRWUDB	1 400	60	60	60	85	15
5	SCCWUD	4 000	60	60	60	85	15
6	SSR-PIA	12 500	60	60	60	85	15
7	SSR-PIB	4 200	60	60	60	85	15
8	SSR-PIC	4 200	60	60	60	85	15
9	SCC-PI	4 000	60	60	60	85	15
	Total	76 300					

Tableau 11

Scénario de forte irrigation – zones d'irrigation et paramètres d'exploitation

Zone d'irrigation		Zone irriguée (ha)	Niveau d'irrigation des cultures (%)			Efficacité de l'apport (%)	Pertes dues à l'évaporation (%)
N°	Identification		Grains	Fourrage	Cultures spéciales		
1	SSR-ID	44 00	60	60	60	85	35
2	SSEWSS	10 500	60	60	60	85	35
3	SSRWUDA	51 700	60	60	60	85	15
4	SSRWUDB	2 400	60	60	60	85	15
5	SCCWUD	4 000	60	60	60	85	15
6	SSR-PIA	15 600	60	60	60	85	15
7	SSR-PIB	5 200	60	60	60	85	15
8	SSR-PIC	5 200	60	60	60	85	15
9	SCC-PI	4 000	60	60	60	85	15
Total		142 600					

Tableau 12

Scénarios WUAM actuel et futur – zones d'irrigation par projets effectifs

N°	Identification	Projet effectif	Zone irriguée (ha)		
			Actuellement	Scénarios 1 et 2	Scénarios 3 et 4
1	SSR-ID	N° 1 (Outlook/côté est)	14 850	20 000	20 000
		N° 2 (Conquest/côté ouest)	0	2 000	24 000
		Total	14 850	22 000	44 000
2	SSEWSS	Plusieurs (desservis par SSWES)	6 100	8 900	10 500
3	SSRWUDA	Chesterfield Flats	290	300	300
		Miry Creek	650	650	650
		Riverhurst	0	3 200	10 700
		Thundercreek-Mortlach	0	2 000	12 400
		Grainland	1 050	2 650	7 250
			0	800	8 100
			0	2 700	7 500
	770	2 800	4 800		
	Total	2 760	15 100	51 700	
4	SSRWUDB	French Flats	160	400	600
		Moon Lake	240	1 000	1 800
		Total	400	1 400	2 400
5	SCCWUD	North Waldeck	630	700	700
		Rush Lake	2 400	2 600	2 600
		Herbert	600	700	700
		Total	3 630	4 000	4 000
6	SSR-PIA	Irrigation privée	-	12 500	15 600
7	SSR-PIB	Irrigation privée	-	4 200	5 200
8	SSR-PIC	Irrigation privée	-	4 200	5 200
9	SCC-PI	Irrigation privée	-	4 000	4 000
Grand total			27 740	76 300	142 600

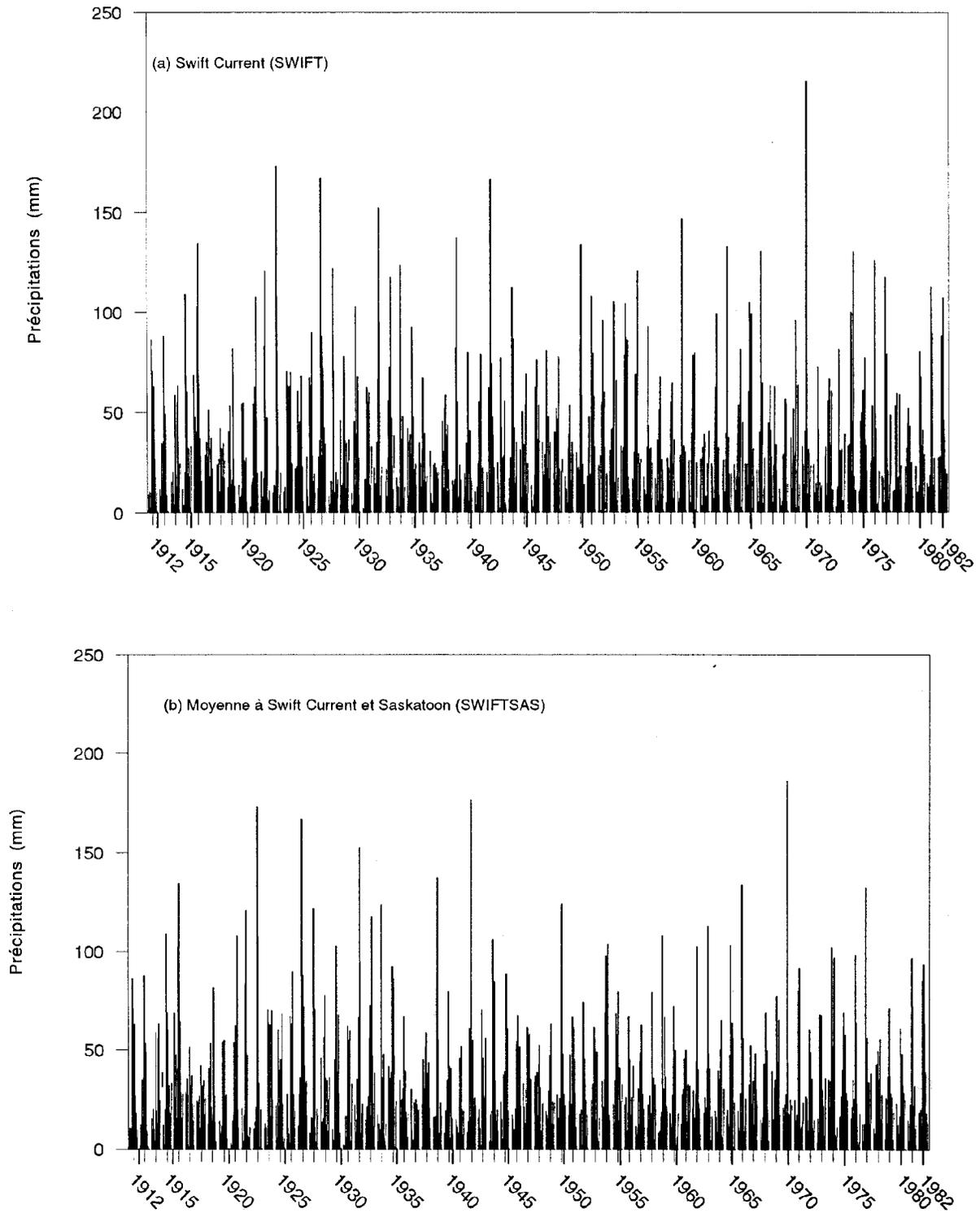


Figure 10. Données sur les précipitations ayant servi au calcul de l'eau utilisée pour l'irrigation.

Tableau 13
Données sur l'évapotranspiration
des cultures

Mois	ÉTP _r * (mm)†	Facteurs mensuels des cultures		
		Grains	Fourrage	Cultures spéciales
Mai	153,8	0,25	0,80	0,29
Juin	180,0	0,82	0,94	0,64
Juillet	189,05	1,11	0,95	0,89
Août	176,9	0,47	0,83	0,92
Septembre	126,5	0,25	0,73	0,52

*Évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle de référence.
†D'après Hobbs et Krogman, 1983.

périodes suivantes pour lesquelles des données ont été accumulées :

- précipitations : 71 ans (1912 à 1982)
- évaporation (lac Diefenbaker) : 56 ans (1912 à 1967)
- écoulements naturels :
 - 56 ans (1912 à 1967) pour tous les noeuds sauf pour le noeud DUMMY01
 - 71 ans (1912 à 1982) pour le noeud DUMMY01
- écoulements à la frontière :
 - 28 ans (1928 à 1955) pour les scénarios 1 et 3
 - 71 ans (1912 à 1982) pour les scénarios 2 et 4

Les résultats des simulations du bilan hydrologique global devraient donc couvrir les périodes qui vont de 1928 à 1955 (28 ans) pour les scénarios 1 et 3 et de 1912 à 1967 (56 ans) pour les scénarios 2 et 4.

Les données sur l'écoulement naturel ainsi que les hypothèses posées au sujet de l'écoulement à la frontière de l'Alberta et de la Saskatchewan sont présentées sous forme graphique dans l'annexe B.

3. ANALYSE DES RÉSULTATS

3.1 Consommation des prélèvements d'eau

Des prévisions ont été établies pour le total des quantités d'eau prélevées dans le bassin et la consommation attribuable à l'industrie, aux zones

urbaines et rurales, au cheptel et à l'irrigation (tableau 14). Dans le cadre des scénarios de référence (1 et 2), on prévoit que le prélèvement moyen d'eau dans le bassin s'établira à 470,15 Mm³ pour une consommation de 283,89 Mm³ (60 %). Pour les scénarios de forte irrigation (3 et 4), les moyennes des prélèvements et de la consommation passeront à 839,88 et 518,73 Mm³ respectivement (soit une augmentation d'environ 79 %). Dans ce total, l'irrigation est à l'origine d'approximativement 90 % et 94 % des prélèvements pour les deux séries de scénarios. Du point de vue de la consommation, cette proportion augmente pour atteindre 94 % et 97 %. On remarquera que ces chiffres ne tiennent pas compte des autres grands éléments de consommation, c'est-à-dire l'évaporation dans le réservoir et la dérivation de Qu'Appelle. Ils excluent aussi la consommation d'eau de la centrale thermique (centrale Queen Elizabeth), qui est négligeable puisque la quasi-totalité de l'eau prélevée pour assurer le refroidissement de la centrale est restituée.

On estime habituellement que les données concernant les utilisations moyennes de l'eau sont suffisantes pour ce qui est de planifier la distribution de l'eau. Toutefois, les conditions moyennes ne donnent pas toujours un aperçu complet des divers types d'utilisation de l'eau puisqu'elles masquent les variations qui

Tableau 14
Prévisions de prélèvement d'eau*

Secteur	Scénarios du cas de référence		Scénarios de forte irrigation	
	Prélèvement moyen (Mm ³)	Consommation moyenne (Mm ³)	Prélèvement moyen (Mm ³)	Consommation moyenne (Mm ³)
Industrie	13,16	3,00	13,16	3,00
Villes et campagnes	29,01	7,52	29,01	7,52
Cheptel	5,71	4,99	5,71	4,99
Irrigation moyenne	422,27	268,38	792,00	503,22
Total	470,15	283,89	839,88	518,73

*À l'exclusion de l'évaporation et des dérivations.

peuvent se produire d'une année sur l'autre. Cela est tout particulièrement vrai pour l'irrigation, qui peut nécessiter des quantités d'eau notablement différentes d'une année à l'autre. La partie qui suit analyse l'utilisation de l'eau à des fins d'irrigation dans le bassin et ses variations, tout d'abord dans des conditions moyennes, extrêmement sèches et humides puis par l'intermédiaire d'un diagramme de fréquence.

Les pertes d'eau dues aux dérivations et à l'évaporation dans le réservoir du lac Diefenbaker sont analysées dans la partie 3.2.

3.1.1 Utilisation de l'eau à des fins d'irrigation

L'irrigation est de loin la principale forme d'utilisation de l'eau dans le bassin, et cette utilisation peut connaître des variations considérables d'une année à l'autre pour une zone et une culture données, principalement du fait des conditions météorologiques qui prévalent. Cette variation est décrite dans les tableaux 15 et 16 pour les scénarios du cas de référence et du cas de forte irrigation, respectivement. Ces tableaux résument les simulations de l'utilisation de l'eau à des fins d'irrigation dans des conditions d'utilisation maximum (c.-à-d. en période sèche), minimum (c.-à-d. par temps pluvieux) et

moyenne par zone d'irrigation et aussi pour l'intégralité du bassin. Les tableaux 17 et 18 indiquent, par noeud, quelles ont été les quantités maximum et minimum d'eau prélevée pour l'irrigation pour certaines années sèches et pluvieuses en précisant quelle a été la moyenne de ce prélèvement. L'importance de l'écart avec les conditions moyennes saute aux yeux. On remarquera que les résultats dont il est fait état ne reflètent que les conséquences des variations dans les précipitations pour les quantités d'eau utilisées pour l'irrigation. On a supposé que d'autres paramètres, par exemple l'évapotranspiration potentielle mensuelle, étaient demeurés constants durant la période qui a fait l'objet de la simulation.

3.1.1.1 Analyse de fréquence de l'utilisation de l'eau à des fins d'irrigation

Les simulations d'utilisation de l'eau à des fins d'irrigation dans le cadre des scénarios de référence et de forte irrigation sont respectivement représentées par les courbes de fréquence des figures 11 et 12. Ces courbes ont été calculées en fonction de l'intégralité des étendues irriguées à l'intérieur de la partie du bassin de la rivière Saskatchewan Sud qui se trouve en Saskatchewan (c.-à-d. 76 300 ha pour le cas de référence et 142 600 ha pour le scénario de forte irrigation) et

Tableau 15

Simulation de l'utilisation de l'eau à des fins d'irrigation par zone d'irrigation pour les scénarios du cas de référence

N° de zone	Utilisation maximum (année sèche)			Utilisation minimum (année pluvieuse)			Utilisation moyenne	
	Prélèvement (Mm ³)	Consommation (Mm ³)	Année*	Prélèvement (Mm ³)	Consommation (Mm ³)	Année†	Prélèvement (Mm ³)	Consommation (Mm ³)
1	151,18	98,85	1937	60,00	39,23	1916	107,11	70,03
2	62,54	41,29	1937	26,19	17,29	1916	45,11	29,78
3	121,60	75,75	1937	58,03	36,33	1916	90,58	56,70
4	11,22	7,02	1937	5,38	3,37	1916	8,40	5,26
5	35,80	20,97	1973	16,20	9,49	1954	27,29	15,98
6	95,50	60,19	1937	44,19	27,85	1916	71,00	44,75
7	32,09	20,22	1937	14,85	9,36	1916	23,86	15,04
8	32,09	20,22	1937	14,85	9,36	1916	23,86	15,04
9	33,42	21,06	1973	14,84	9,35	1954	25,06	15,79
Total	575,44	365,57		254,53	161,63		422,27	268,37

Remarque : précipitations pour la période de 1912 à 1982.

* Année de précipitations record entraînant un maximum de demande en eau d'irrigation.

† Année de précipitations record entraînant un minimum de demande en eau d'irrigation.

Tableau 16

Simulation de l'utilisation de l'eau pour l'irrigation par zone d'irrigation pour les scénarios de forte irrigation

N° de zone	Utilisation maximum (année sèche)			Utilisation minimum (année pluvieuse)			Utilisation moyenne	
	Prélèvement (Mm ³)	Consommation (Mm ³)	Année*	Prélèvement (Mm ³)	Consommation (Mm ³)	Année†	Prélèvement (Mm ³)	Consommation (Mm ³)
1	302,36	197,70	1937	120,00	73,48	1916	214,21	140,07
2	73,78	48,71	1937	30,90	20,40	1916	53,22	35,14
3	414,29	259,35	1937	198,69	124,38	1916	310,13	194,14
4	19,23	12,04	1937	9,22	5,77	1916	14,40	9,01
5	35,80	20,97	1973	16,20	9,49	1954	27,29	15,98
6	119,19	75,12	1937	55,14	34,75	1916	88,61	55,85
7	39,73	25,04	1937	18,38	11,58	1916	29,54	18,62
8	39,73	25,04	1937	18,38	11,58	1916	29,54	18,62
9	33,42	21,06	1973	14,84	9,35	1954	25,06	15,79
Total	1077,53	685,03		481,75	300,78		792,00	503,22

Remarque : précipitations pour la période de 1912 à 1982.

* Année de précipitations record entraînant un maximum de demande en eau d'irrigation.

† Année de précipitations record entraînant un minimum de demande en eau d'irrigation.

Tableau 17

Simulation de l'utilisation de l'eau par noeud dans diverses conditions pour le scénario du cas de référence 2

N°	Prélèvement d'eau pour l'irrigation (Mm ³)		
	Maximum (année sèche, 1937)	Minimum (année pluvieuse, 1916)	Moyenne
1	-	-	-
2	68,37	34,83	51,4
3	430,22	188,41	313,3
4	43,31	20,23	32,1
5	32,10	14,85	23,8
Total	574,00	258,32	420,6

Remarque : précipitations de 1912 à 1967.

Tableau 18

Simulation de l'utilisation de l'eau par noeud dans diverses conditions pour le scénario 4 de forte irrigation

N°	Prélèvement d'eau pour l'irrigation (Mm ³)		
	Maximum (année sèche, 1937)	Minimum (année pluvieuse, 1916)	Moyenne
1	-	-	-
2	68,37	34,83	51,4
3	909,62	404,07	662,7
4	59,05	27,60	43,8
5	39,73	18,38	33,1
Total	1076,77	484,88	791,0

Remarque : précipitations de 1912 à 1967.

des précipitations relevées entre 1912 et 1982. Elles révèlent dans quelle mesure il est probable que l'eau utilisée à des fins d'irrigation dépasse une certaine quantité. Par exemple, dans le cas du scénario de forte irrigation, la quantité sera toujours supérieure à 480 Mm³, dépassera 700 Mm³ environ 80 % du temps et sera supérieure à 800 Mm³ approximativement 50 % du temps.

3.2 Lac Diefenbaker

Les résultats fournis par le WUAM en ce qui concerne le lac Diefenbaker sont présentés relativement en détail. Ils n'ont toutefois qu'une valeur expérimentale et devraient être interprétés en tenant compte des hypothèses et des données employées dans le cadre du scénario, et notamment de la courbe des niveaux optimaux et des contraintes d'exploitation, des apports d'eau dans le réservoir et des diverses formes d'utilisation de l'eau, y compris celle qui est attribuable à la dérivation de Qu'Appelle.

3.2.1 Nature des prélèvements d'eau

Les principaux prélèvements d'eau dans le lac Diefenbaker sont le fait de l'irrigation, de l'évaporation et de la dérivation de

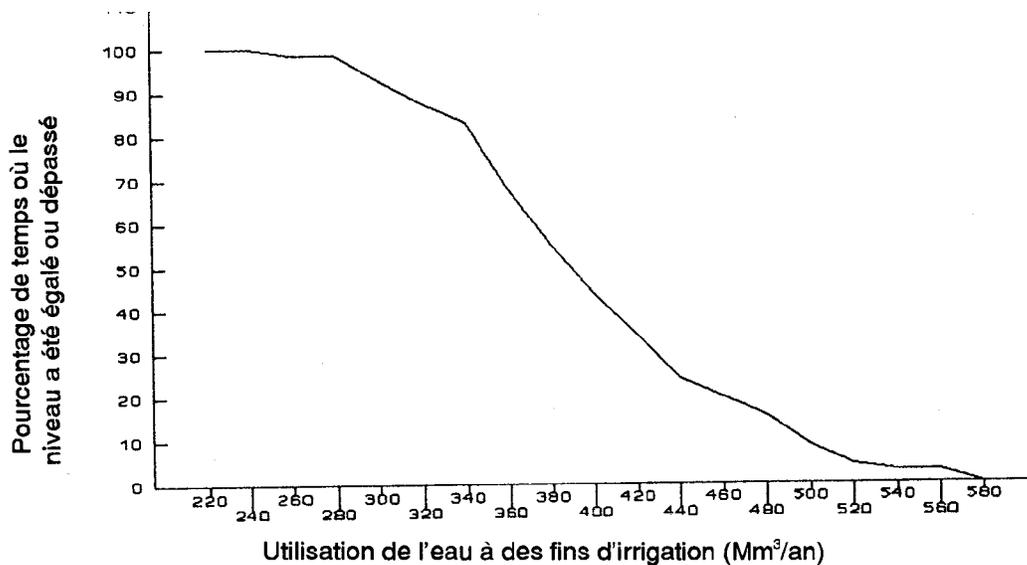


Figure 11. Simulation de l'utilisation de l'eau à des fins d'irrigation pour les scénarios du cas de référence (précipitations 1912-1982)

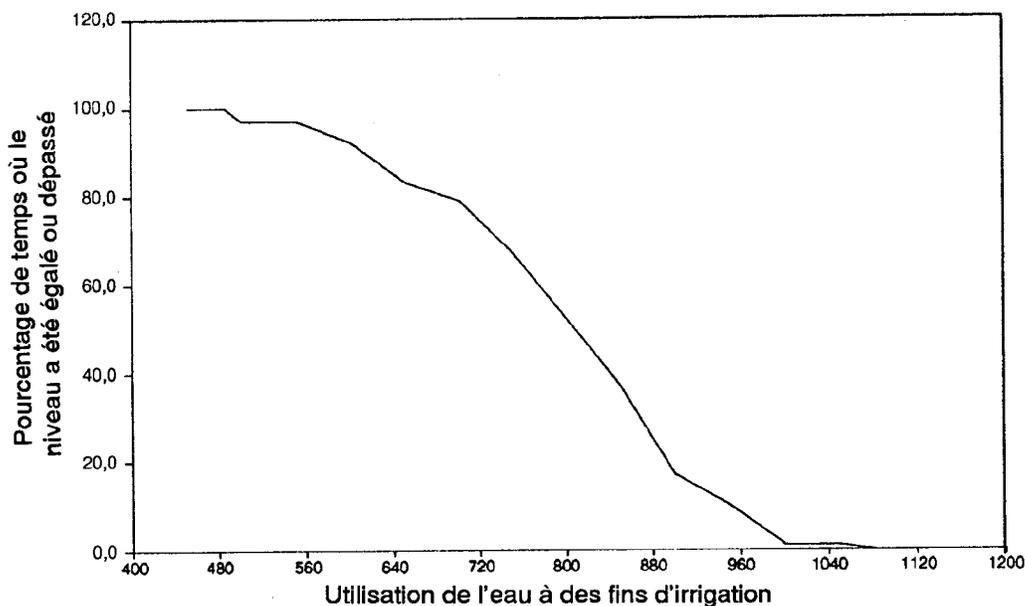


Figure 12. Simulation de l'utilisation de l'eau à des fins d'irrigation pour le cadre des scénarios de forte irrigation (précipitations 1912-1982)

Qu'Appelle⁵. Ces formes d'utilisation représentent plus de 95 % de l'ensemble des

⁵ L'utilisation *in situ* du cours d'eau, par exemple lorsque de l'eau est libérée du réservoir afin de produire de l'électricité, représente également une forme de consommation de l'eau du lac mais celle-ci n'a pas été prise en considération dans le cadre de la présente analyse.

quantités d'eau prélevées dans le lac. La figure 13 indique quels sont les prélèvements annuels moyens d'eau du lac prévus pour l'an 2 000 pour les deux séries de scénarios d'utilisation de l'eau. Les scénarios du cas de référence (1 et 2) supposent que 58 500 ha seront directement approvisionnés à partir du lac Diefenbaker. Les

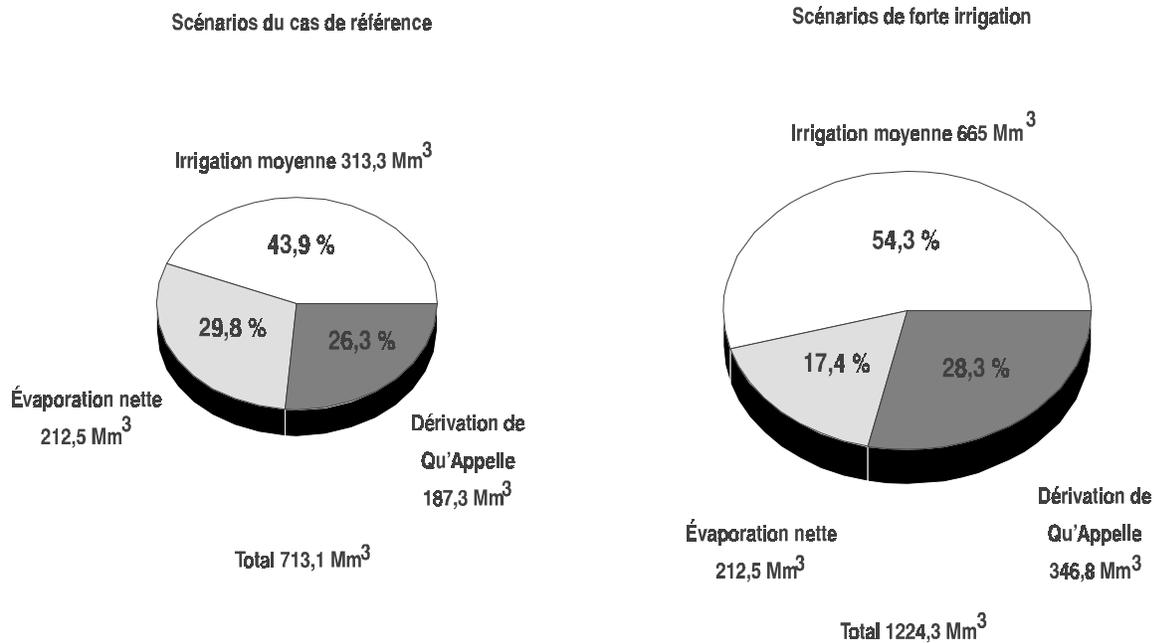


Figure 13. Prélèvements majeurs annuels moyens prévus pour le lac Diefenbaker

scénarios de forte irrigation (3 et 4) portent ce chiffre à 121 800 ha. Les résultats se fondent sur la simulation faite pour la période qui va de 1912 à 1967.

Dans le cas des scénarios de forte irrigation (3 et 4) la moyenne annuelle de prélèvement à des fins d'irrigation uniquement serait plus que doublée (2,1 fois) par rapport aux prévisions des scénarios du cas de référence (1 et 2) (c.-à-d. une augmentation de 110 %). Lorsque l'on tient compte de la dérivation de Qu'Appelle, la part que l'irrigation occupe dans le total de l'augmentation (c.-à-d. 511,2 Mm³, soit 72 %) chuterait à seulement 69 %, la dérivation étant à l'origine des 31 % restants. On remarquera que l'accroissement de la quantité d'eau qui est consacrée à l'irrigation est proportionnel à l'accroissement de la superficie irriguée puisque l'on n'a modifié aucun des autres paramètres dans les deux séries de scénarios. Les résultats seraient différents si l'on changeait n'importe lequel des autres paramètres ou une combinaison donnée de ceux-ci.

On a également effectué l'analyse des formes de consommation d'eau provenant du lac en

période de sécheresse ou de pluviosité extrême afin de compléter les résultats que l'on a obtenus pour les conditions moyennes (figure 14). À l'évidence, la sécheresse constitue le pire cas climatique. Dans de telles conditions, si l'on fait exception de toute dérivation d'eau, la conjugaison d'une forte irrigation et de pertes importantes par évaporation donne des prélèvements d'eau correspondant à 130 % de la moyenne, ce qui s'oppose à un peu plus de 50 % de la moyenne pour l'année extrêmement pluvieuse. On peut donc en conclure que les prélèvements moyens d'eau du lac se situent davantage du côté des extrêmes supérieurs que de celui des extrêmes inférieurs, ce qu'un schéma de fréquence des prélèvements d'eau dans le lac Diefenbaker révèle particulièrement clairement.

3.2.1.1 Analyse de fréquence des prélèvements d'eau dans le lac Diefenbaker

L'effet combiné des prélèvements d'eau dus à l'irrigation et de l'évaporation nette dans le lac Diefenbaker a été analysé sur la base des résultats de la simulation WUAM de la période qui va de 1912 à 1967 et présenté sous la forme d'une

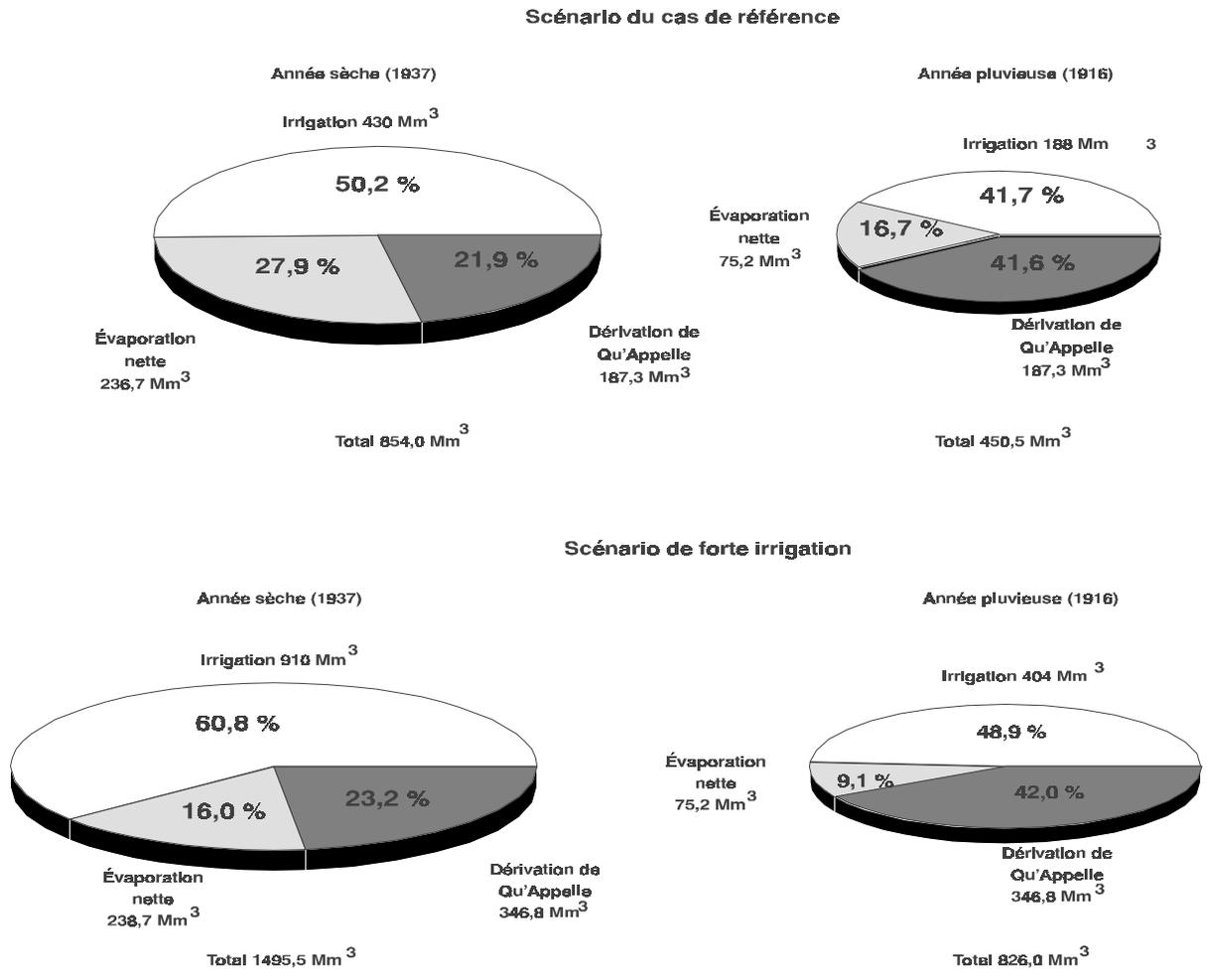


Figure 14. Prélèvements majeurs annuels moyens prévus pour le lac Diefenbaker dans des conditions extrêmement sèches et extrêmement pluvieuses.

courbe de fréquence (figure 15). Pour les scénarios de forte irrigation, cette courbe a été calculée en tenant uniquement compte des zones qui sont irriguées grâce à de l'eau provenant directement du lac (121 800 ha). On remarquera que les quantités d'eau restituées au lac à la suite de l'irrigation ont été négligées lorsque ce schéma a été élaboré.

3.2.2 Répercussions pour les débits sortants et les niveaux du lac Diefenbaker

Les tableaux 19 à 26 présentent des résumés statistiques des niveaux du lac et des débits sortants du réservoir pour les quatre scénarios ayant fait l'objet d'une simulation. Les

résultats sont exposés sur une base mensuelle et sont mis en corrélation avec la courbe des niveaux optimaux et les contraintes d'exploitation qui ont été établies pour le lac (figure 3). On se référera donc à la figure 3 au moment d'interpréter ces résultats.

Les figures 16 à 20 sont des graphiques de fréquence des niveaux du lac en fin de mois. Elles indiquent quels sont les pourcentages de temps où un niveau donné est atteint ou dépassé et comparent les quatre scénarios. La figure 16 est basée sur l'intégralité de la période considérée alors que les figures 17 à 20 correspondent aux mois de juin, juillet, août et septembre respectivement.

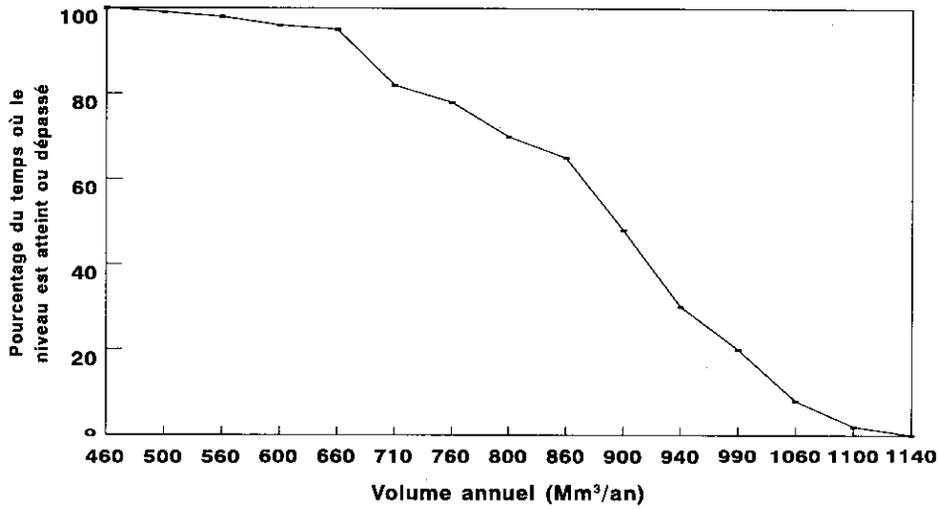


Figure 15. Lac Diefenbaker — Combinaison des prélèvements dus à l'irrigation et à l'évaporation nette dans le cadre des scénarios de forte irrigation,

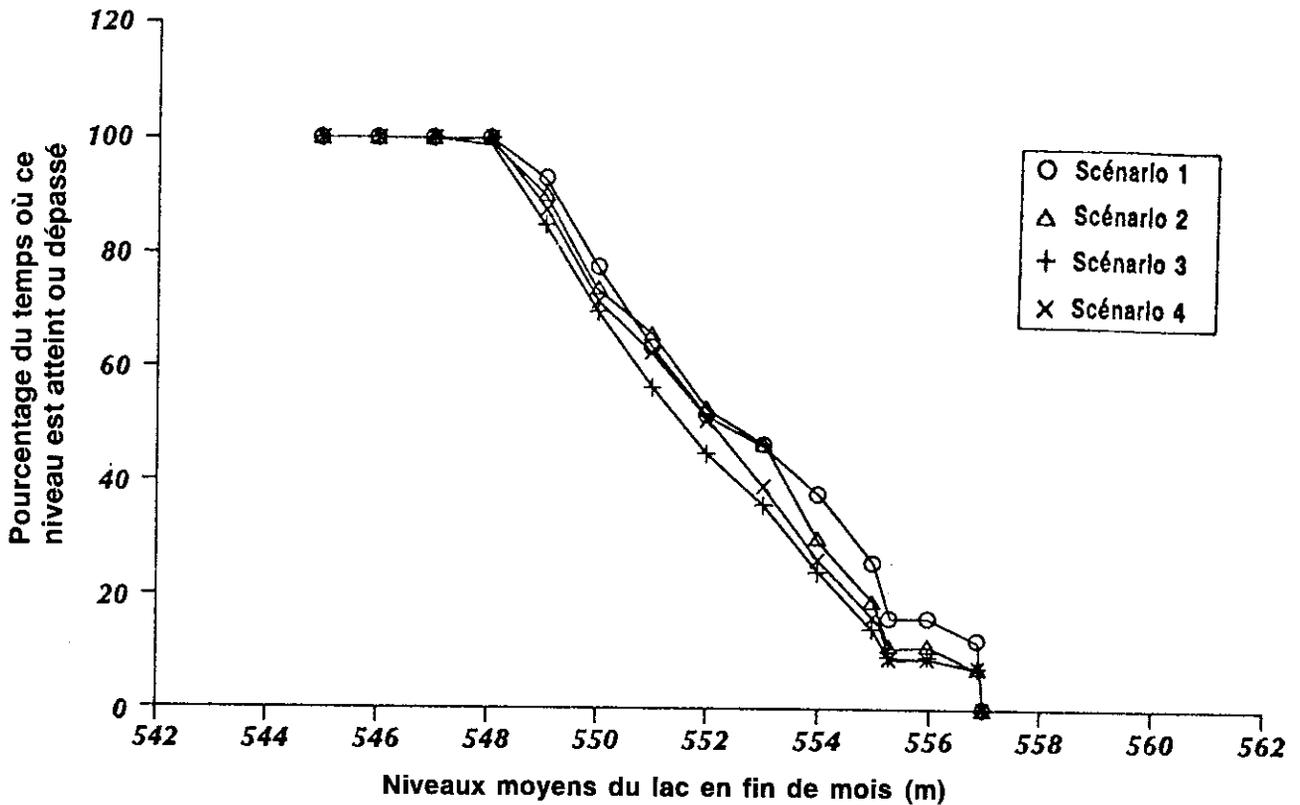


Figure 16. Niveaux moyens en fin de mois du lac Diefenbaker.

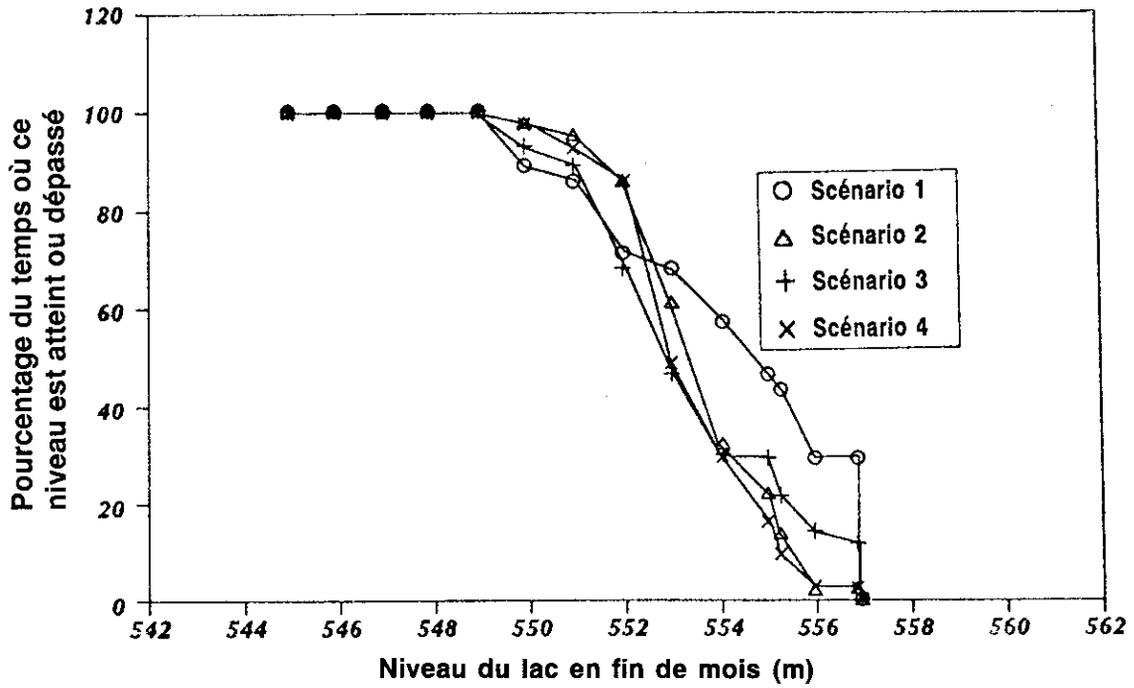


Figure 17. Niveaux du lac Diefenbaker au 30 juin.

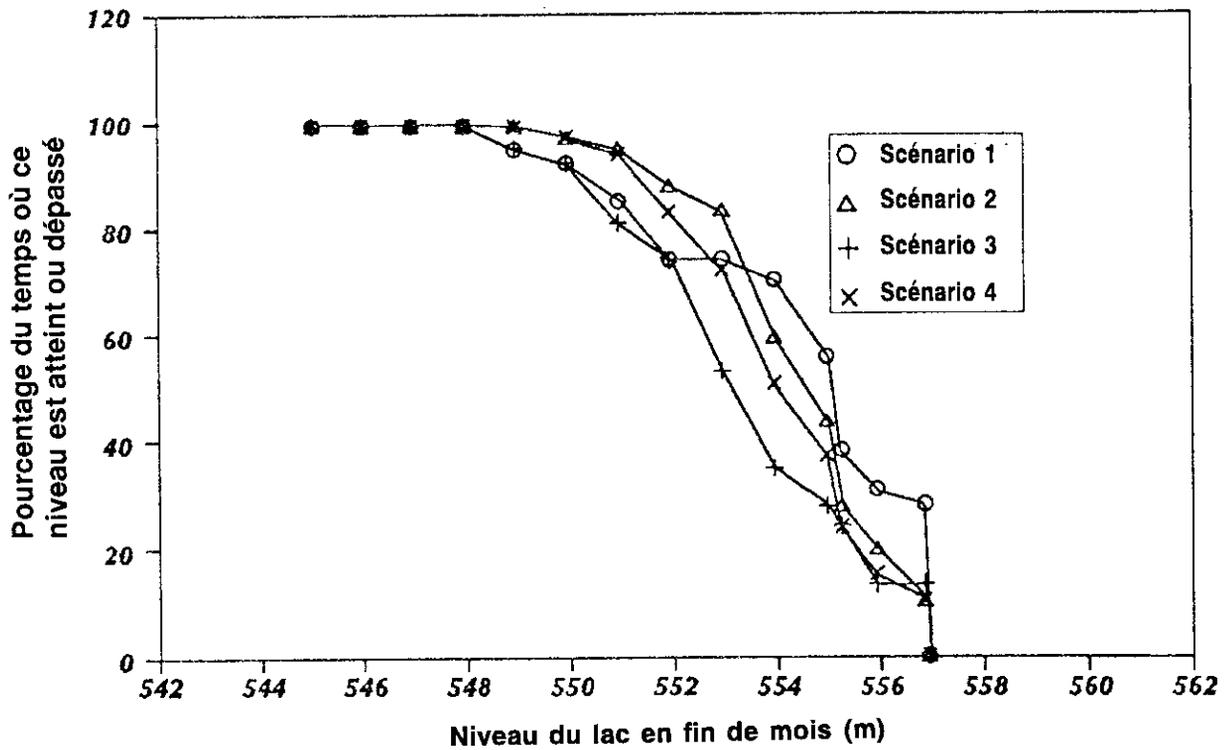


Figure 18. Niveaux du lac Diefenbaker au 31 juillet.

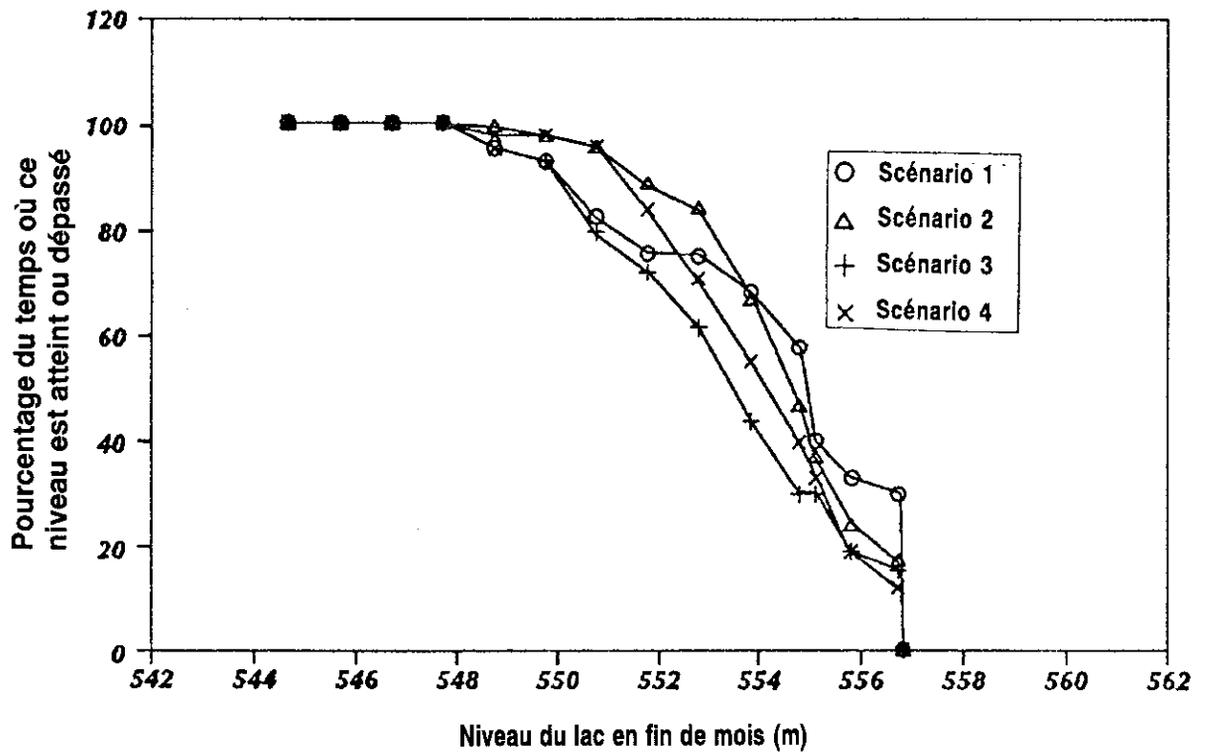


Figure 19. Niveaux du lac Diefenbaker au 31 août.

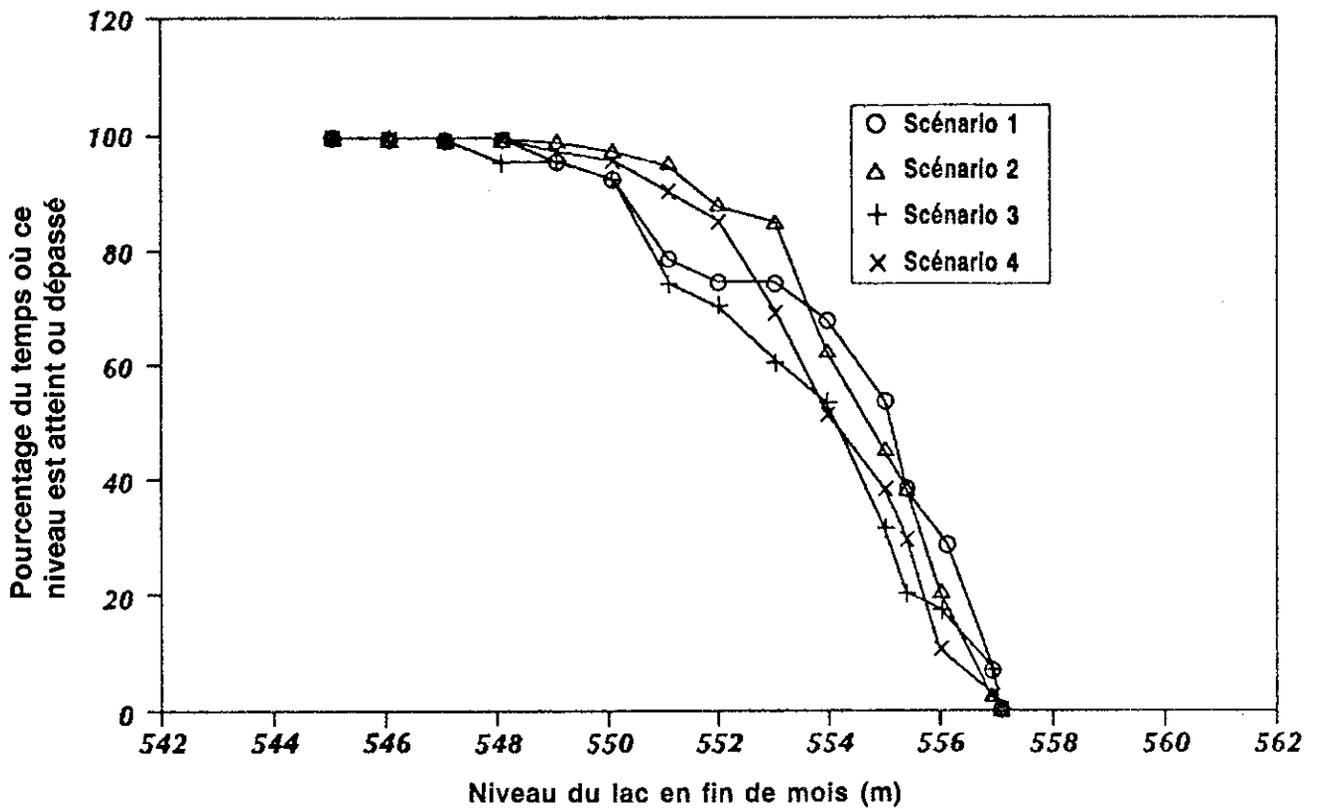


Figure 20. Niveaux du lac Diefenbaker au 30 septembre.

Tableau 19
Niveaux du lac Diefenbaker pour le scénario 1 du cas de référence *

Mois	Nombre de mois	Courbe des niveaux optimaux		Fréquence (%)						
		Supérieure (m)	Inférieure (m)	À l'apport minimum (545,6 m)	En dessous de la courbe des niveaux optimaux	Au minimum de la courbe des niveaux optimaux	À l'intérieur des limites	Au maximum de la courbe des niveaux optimaux	Au-dessus de la courbe des niveaux optimaux	À l'apport maximum (556,9 m)
Janv.	28	553,0	550,5	0	21	14	61	4	0	0
Févr.	28	551,5	549,0	0	4	43	50	4	0	0
Mars	28	551,5	547,5	0	0	11	89	0	0	0
Avril	28	552,5	548,5	0	32	18	39	7	4	0
Mai	28	554,0	550,0	0	43	11	32	11	0	4
Juin	28	556,5	555,3	0	57	14	11	7	4	7
Juillet	28	556,9	555,3	0	61	7	4	0	0	29
Août	28	556,5	555,3	0	64	4	7	21	0	4
Sept.	28	556,0	555,3	0	64	7	11	11	0	7
Oct.	28	556,0	555,0	0	61	11	18	7	0	4
Nov.	28	555,0	554,0	0	46	11	25	14	4	0
Déc.	28	555,0	552,5	0	29	21	46	4	0	0
Total	336		Moy.	0	40	14	33	7	1	4

*Écoulements de 1928 à 1955

Tableau 20
Débits sortant du lac Diefenbaker pour le scénario 1 du cas de référence *

Mois	Nombre de mois	Courbe des niveaux optimaux			Fréquence (%)						
		Débit minimum ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Débit maximum ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Débit visé ($m^3 \cdot s^{-1}$)	En dessous du minimum	Au minimum	En dessous de l'objectif	À l'objectif	Au-dessus de l'objectif	Au maximum	Au-dessus du maximum
Janv.	28	42,5	425,0	329,0	0	21	14	61	4	0	0
Févr.	28	42,5	425,0	310,0	0	4	43	50	4	0	0
Mars	28	42,5	425,0	231,0	0	0	11	89	0	0	0
Avril	28	42,5	600,0	160,0	0	32	18	39	7	4	0
Mai	28	42,5	600,0	150,0	0	43	11	32	11	0	4
Juin	28	42,5	600,0	252,0	0	57	14	11	7	4	7
Juillet	28	42,5	600,0	221,0	0	61	7	4	21	0	7
Août	28	42,5	425,0	159,0	0	64	4	7	21	0	4
Sept.	28	42,5	425,0	146,0	0	64	7	11	11	0	7
Oct.	28	42,5	425,0	160,0	0	61	11	18	7	0	4
Nov.	28	42,5	425,0	226,0	0	46	11	25	14	4	0
Déc.	28	42,5	425,0	285,0	0	29	21	46	4	0	0
Total	336			Moy.	0	40	14	33	9	1	3

*Débit de 1928 à 1955

Tableau 21

Niveaux du lac Diefenbaker pour le scénario 2 du cas de référence*

Mois	Nombre de mois	Courbe des niveaux optimaux		Fréquence (%)						
		Supérieure (m)	Inférieure (m)	À l'apport minimum (545,6 m)	En dessous de la courbe des niveaux optimaux	Au minimum de la courbe des niveaux optimaux	À l'intérieur des limites	Au maximum de la courbe des niveaux optimaux	Au-dessus de la courbe des niveaux optimaux	À l'apport maximum (556,9 m)
Janv.	56	553,0	550,5	0	7	79	14	0	0	0
Févr.	56	551,5	549,0	0	2	91	7	0	0	0
Mars	56	551,5	547,5	0	0	70	30	0	0	0
Avril	56	552,5	548,5	0	55	34	11	0	0	0
Mai	56	554,0	550,0	0	50	25	23	2	0	0
Juin	56	556,5	555,3	0	91	7	0	2	0	0
Juillet	56	556,9	555,3	0	73	5	16	0	0	0
Août	56	556,5	555,3	0	66	11	14	9	0	0
Sept.	56	556,0	555,3	0	70	9	12	7	0	0
Oct.	56	556,0	555,0	0	61	18	16	5	0	0
Nov.	56	555,0	554,0	0	48	36	7	9	0	0
Déc.	56	555,0	552,5	0	25	61	14	0	0	0
Total	672		Moy.	0	46	37	14	3	0	0

*Écoulements de 1912 à 1967

Tableau 22

Débits sortant du lac Diefenbaker pour le scénario 2 du cas de référence*

Mois	Nombre de mois	Courbe des niveaux optimaux			Fréquence (%)						
		Débit minimum (m ³ ·s ⁻¹)	Débit maximum (m ³ ·s ⁻¹)	Débit visé (m ³ ·s ⁻¹)	En dessous du minimum	Au minimum	En dessous de l'objectif	À l'objectif	Au-dessus de l'objectif	Au maximum	Au-dessus du maximum
Janv.	56	42,5	425,0	329,0	0	7	79	14	0	0	0
Févr.	56	42,5	425,0	310,0	0	2	91	7	0	0	0
Mars	56	42,5	425,0	231,0	0	0	70	30	0	0	0
Avril	56	42,5	600,0	160,0	0	55	34	11	0	0	0
Mai	56	42,5	600,0	150,0	0	50	23	25	2	0	0
Juin	56	42,5	600,0	252,0	0	91	7	0	2	0	0
Juillet	56	42,5	600,0	221,0	0	73	5	16	5	0	0
Août	56	42,5	425,0	159,0	0	66	11	14	9	0	0
Sept.	56	42,5	425,0	146,0	0	70	9	12	7	2	0
Oct.	56	42,5	425,0	160,0	0	61	18	16	5	0	0
Nov.	56	42,5	425,0	226,0	0	48	36	7	9	0	0
Déc.	56	42,5	425,0	285,0	0	25	61	14	0	0	0
Total	672			Moy.	0	46	37	14	3	0	0

*Débit de 1912 à 1967

Tableau 23

Niveaux du lac Diefenbaker pour le scénario 3 de forte irrigation*

Mois	Nombre de mois	Courbe des niveaux optimaux		Fréquence (%)						
		Supérieure (m)	Inférieure (m)	À l'apport minimum (545,6 m)	En dessous de la courbe des niveaux optimaux	Au minimum de la courbe des niveaux optimaux	À l'intérieur des limites	Au maximum de la courbe des niveaux optimaux	Au-dessus de la courbe des niveaux optimaux	À l'apport maximum (556,9 m)
Janv.	28	553,0	550,5	0	29	50	21	0	0	0
Févr.	28	551,5	549,0	0	21	61	18	0	0	0
Mars	28	551,5	547,5	0	7	64	29	0	0	0
Avril	28	552,5	548,5	0	54	25	18	4	0	0
Mai	28	554,0	550,0	0	57	14	21	7	0	0
Juin	28	556,5	555,3	0	79	7	4	7	4	0
Juillet	28	556,9	555,3	0	75	7	7	0	0	11
Août	28	556,5	555,3	0	79	4	11	4	4	0
Sept.	28	556,0	555,3	0	79	0	14	0	7	0
Oct.	28	556,0	555,0	0	79	11	4	7	0	0
Nov.	28	555,0	554,0	0	68	14	11	7	0	0
Déc.	28	555,0	552,5	0	39	39	21	0	0	0
Total	336		Moy.	0	55	25	15	3	1	1

*Écoulements de 1928 à 1955

Tableau 24

Débits sortant du lac Diefenbaker pour le scénario 3 de forte irrigation*

Mois	Nombre de mois	Courbe des niveaux optimaux			Fréquence (%)						
		Débit minimum (m ³ .s ⁻¹)	Débit maximum (m ³ .s ⁻¹)	Débit visé (m ³ .s ⁻¹)	En dessous du minimum	Au minimum	En dessous de l'objectif	À l'objectif	Au-dessus de l'objectif	Au maximum	Au-dessus du maximum
Janv.	28	42,5	425,0	329,0	0	29	50	21	0	0	0
Févr.	28	42,5	425,0	310,0	0	21	61	18	0	0	0
Mars	28	42,5	425,0	231,0	0	7	64	29	0	0	0
Avril	28	42,5	600,0	160,0	0	54	25	18	4	0	0
Mai	28	42,5	600,0	150,0	0	57	14	21	7	0	0
Juin	28	42,5	600,0	252,0	0	79	7	4	7	4	0
Juillet	28	42,5	600,0	221,0	0	75	7	7	7	0	4
Août	28	42,5	425,0	159,0	0	79	4	11	4	4	0
Sept.	28	42,5	425,0	146,0	0	79	0	14	0	7	0
Oct.	28	42,5	425,0	160,0	0	79	11	4	7	0	0
Nov.	28	42,5	425,0	226,0	0	68	14	11	7	0	0
Déc.	28	42,5	425,0	285,0	0	39	39	21	0	0	0
Total	336			Moy.	0	55	25	15	4	1	0

*Débit de 1928 à 1955

Tableau 25

Niveaux du lac Diefenbaker pour le scénario 4 de forte irrigation*

Mois	Nombre de mois	Courbe des niveaux optimaux		Fréquence (%)						
		Supérieure (m)	Inférieure (m)	À l'apport minimum (545,6 m)	En dessous de la courbe des niveaux optimaux	Au minimum de la courbe des niveaux optimaux	À l'intérieur des limites	Au maximum de la courbe des niveaux optimaux	Au-dessus de la courbe des niveaux optimaux	À l'apport maximum (556,9 m)
Janv.	56	553,0	550,5	0	14	75	11	0	0	0
Févr.	56	551,5	549,0	0	9	84	7	0	0	0
Mars	56	551,5	547,5	0	2	79	20	0	0	0
Avril	56	552,5	548,5	0	61	30	9	0	0	0
Mai	56	554,0	550,0	0	57	23	18	2	0	0
Juin	56	556,5	555,3	0	95	4	0	2	0	0
Juillet	56	556,9	555,3	0	75	7	14	0	0	4
Août	56	556,5	555,3	0	71	9	14	5	0	0
Sept.	56	556,0	555,3	0	75	14	2	7	0	0
Oct.	56	556,0	555,0	0	68	20	9	4	2	0
Nov.	56	555,0	554,0	0	57	30	4	9	0	0
Déc.	56	555,0	552,5	0	39	52	9	0	0	0
Total	672		Moy.	0	52	36	10	2	0	0

*Écoulements de 1912 à 1967

Tableau 26

Débits sortant du lac Diefenbaker pour le scénario 4 de forte irrigation*

Mois	Nombre de mois	Courbe des niveaux optimaux			Fréquence (%)						
		Débit minimum (m ³ s ⁻¹)	Débit maximum (m ³ s ⁻¹)	Débit visé (m ³ s ⁻¹)	En dessous du minimum	Au minimum	En dessous de l'objectif	À l'objectif	Au-dessus de l'objectif	Au maximum	Au-dessus du maximum
Janv.	56	42,5	425,0	329,0	0	14	75	11	0	0	0
Févr.	56	42,5	425,0	310,0	0	9	84	7	0	0	0
Mars	56	42,5	425,0	231,0	0	2	79	20	0	0	0
Avril	56	42,5	600,0	160,0	0	61	30	9	0	0	0
Mai	56	42,5	600,0	150,0	0	57	23	18	2	0	0
Juin	56	42,5	600,0	252,0	0	95	4	0	2	0	0
Juillet	56	42,5	600,0	221,0	0	75	7	14	4	0	0
Août	56	42,5	425,0	159,0	0	71	9	14	5	0	0
Sept.	56	42,5	425,0	146,0	0	75	14	2	7	2	0
Oct.	56	42,5	425,0	160,0	0	68	20	9	4	0	0
Nov.	56	42,5	425,0	226,0	0	57	30	4	9	0	0
Déc.	56	42,5	425,0	285,0	0	39	52	9	0	0	0
Total	672			Moy.	0	52	36	10	3	0	0

*Débit de 1912 à 1967

Les figures 21 à 25 sont des diagrammes similaires de la fréquence des débits mensuels moyens qui comparent les quantités d'eau qui seraient relâchées par le réservoir dans le cadre des quatre scénarios. La figure 21 est basée sur l'intégralité de la période étudiée alors que les figures 22 à 25 portent respectivement sur les mois de juin, juillet, août et septembre.

Les niveaux moyens en fin de mois du réservoir qui correspondent aux simulations des différents scénarios sont comparés dans la figure 26. Les figures 27 à 30 présentent des courbes des niveaux moyen, maximum et minimum en fin de mois pour chacun des scénarios soumis à une simulation.

L'examen des résultats de l'analyse du lac Diefenbaker met en évidence deux aspects :

- les répercussions pour les usages récréatifs (niveaux inférieurs à 555,3 m censés se maintenir durant les mois de juin à septembre);
- les utilisations *in situ* du cours d'eau en aval du barrage Gardiner (périodes de débit inférieur à 42,5 m³.s⁻¹).

3.2.2.1 Répercussions pour les usages récréatifs

Le tableau 27 présente une récapitulation des résultats des simulations en ce qui concerne les niveaux qu'il faut conserver dans le lac pour qu'il puisse servir à des usages récréatifs. Ce tableau montre que, en moyenne, le niveau du lac autoriserait des usages récréatifs entre environ 21 % et 39 % du temps, selon le scénario. Ces résultats s'opposent à ceux d'une étude du lac Diefenbaker

Tableau 27

Fréquence des niveaux du lac Diefenbaker (en pourcentage) nécessaires à des usages récréatifs*

Scénario	Juin	Juillet	Août	Septembre	Moyenne
1	43	39	36	36	39
2	39	27	34	30	25
3	21	25	21	21	22
4	5	25	29	25	21

*555,3 m

réalisée précédemment (Saskatchewan Water Corporation, 1987) selon laquelle le niveau du lac serait la plupart du temps suffisant pour de tels usages. Les constatations de la présente étude sont toutefois de façon générale similaires à celles de l'Étude Canada-Saskatchewan du bassin de la rivière Saskatchewan Sud (Environnement Canada-SaskWater, 1991).

3.2.2.2 Répercussions sur les utilisations *in situ* du cours d'eau en aval du barrage Gardiner

Les règles d'exploitation du réservoir (figure 3) obligent à maintenir dans toute la mesure du possible (c.-à-d. tant que le niveau de la retenue se situe au-dessus du minimum admissible) un débit sortant minimum de 42,5 m³.s⁻¹. Les simulations montrent que cet impératif sera toujours satisfait (voir figures 21 à 25) dans le cadre de tous les scénarios.

4. SOMMAIRE ET CONCLUSIONS

Le présent rapport a établi l'intérêt que le WUAM présente dans le cadre des études de planification des bassins hydrographiques. Le modèle WUAM est unique dans la mesure où il permet de procéder à une analyse détaillée de l'utilisation de l'eau tout en tenant compte des apports d'eau, du stockage de celle-ci dans des retenues et par d'autres moyens, des dérivations, etc., ce qui fait qu'il convient particulièrement bien aux études effectuées dans le cadre de la planification d'un bassin hydrographique. Ce document décrit quelles sont les données nécessaires, les capacités de modélisation et le type d'informations que fournit le modèle. Il présente une évaluation préliminaire des apports d'eau et des formes d'utilisation futures de celle-ci dans la partie du bassin de la rivière Saskatchewan Sud qui se trouve en Saskatchewan. L'étude se fonde sur quatre scénarios de développement englobant deux niveaux d'utilisation future de l'eau en Alberta et deux niveaux de développement de l'irrigation en Saskatchewan qui sont tous censés prévaloir en l'an 2 000. On a tout particulièrement insisté dans les analyses sur l'utilisation de l'eau à des fins

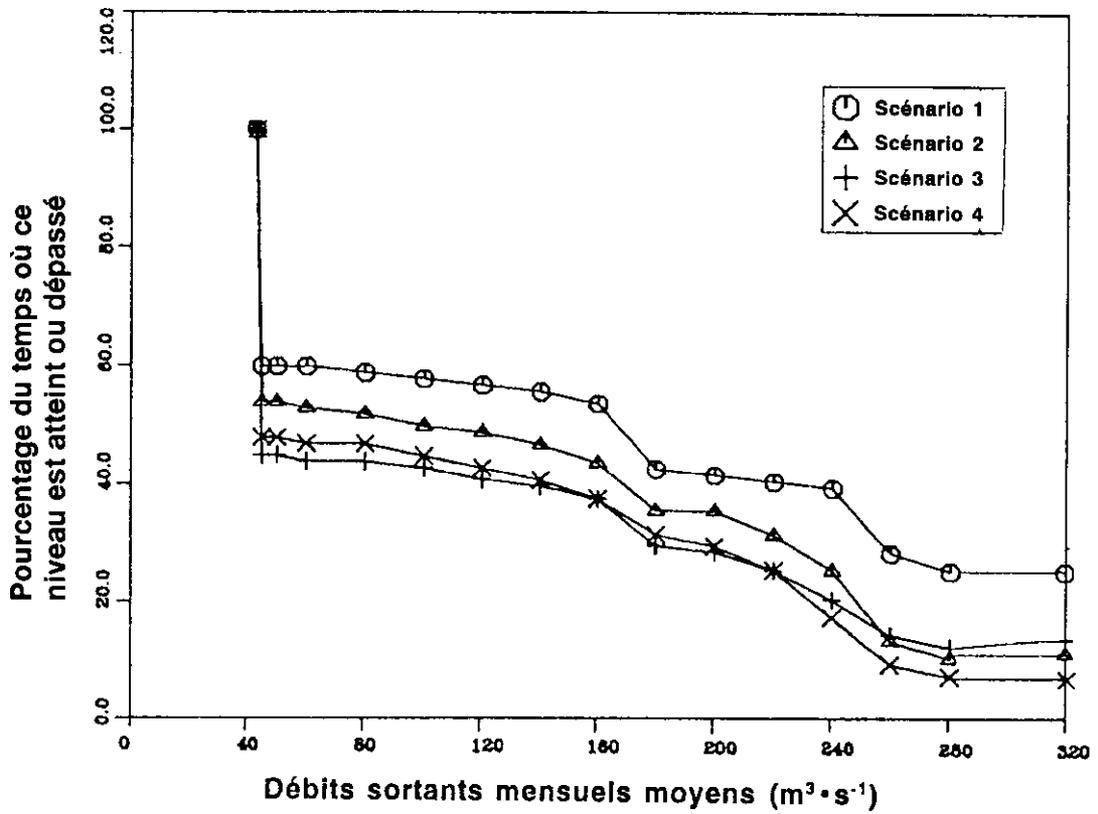


Figure 21. Débits sortants mensuels moyens du lac Diefenbaker.

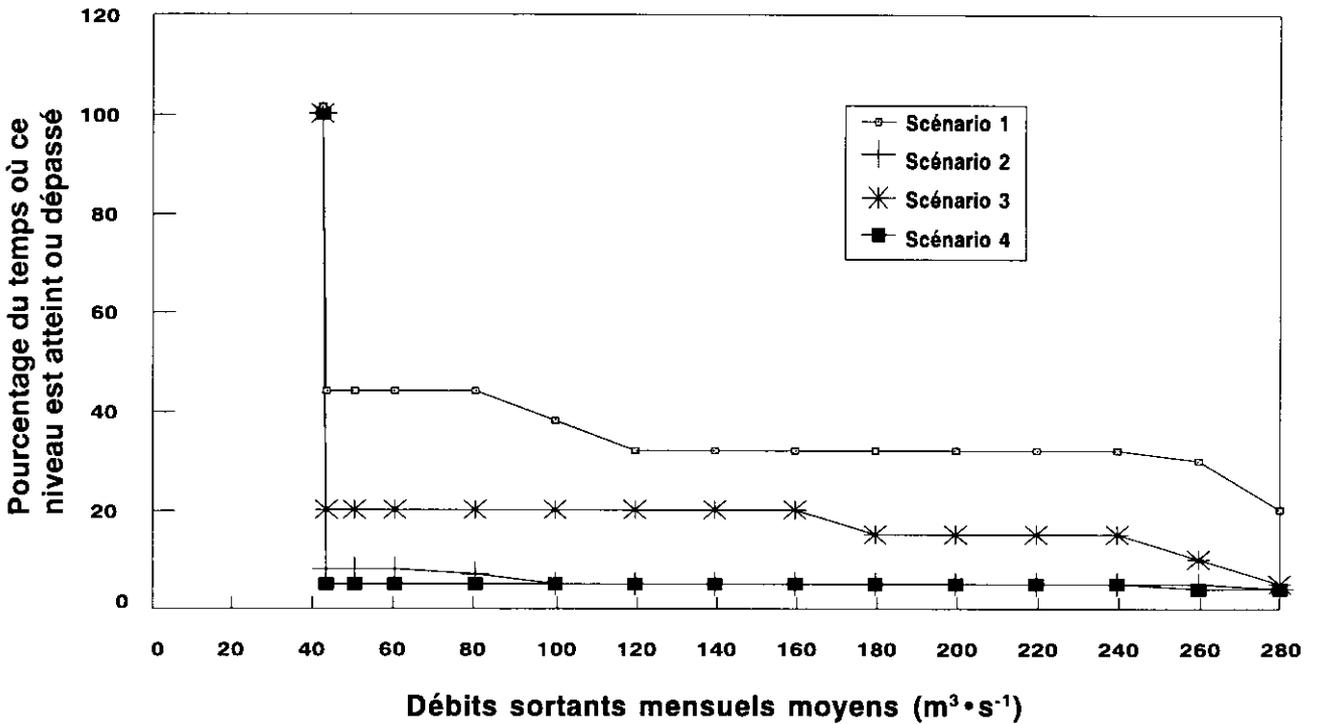


Figure 22. Débits sortants mensuels moyens en juin du lac Diefenbaker.

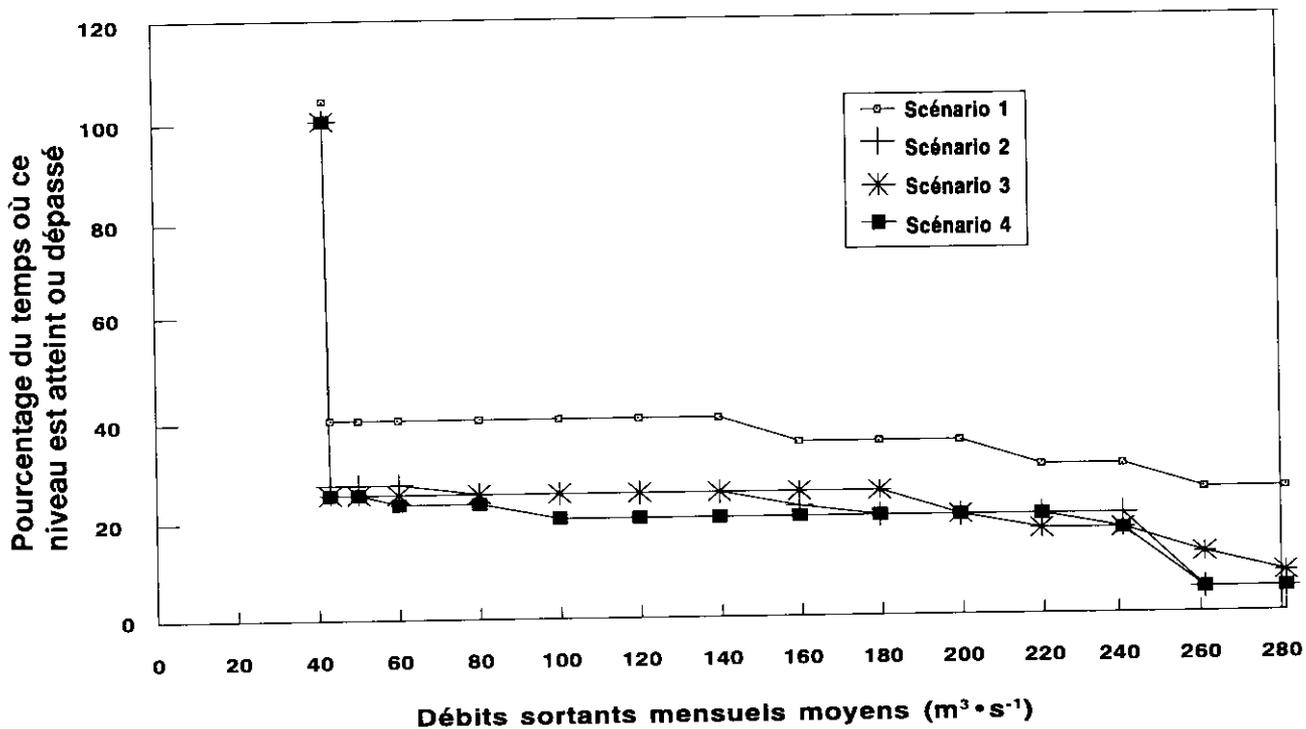


Figure 23. Débits sortants mensuels en juillet du lac Diefenbaker.

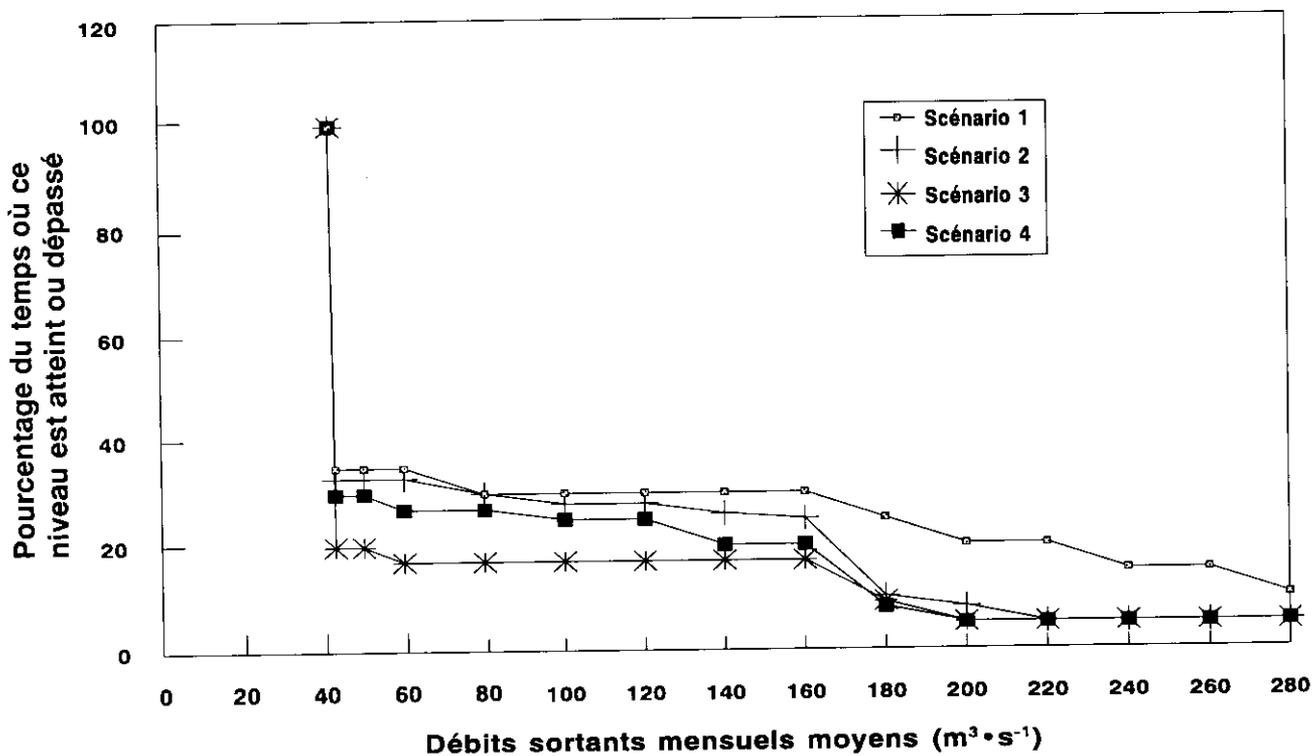


Figure 24. Débits sortants mensuels en août du lac Diefenbaker.

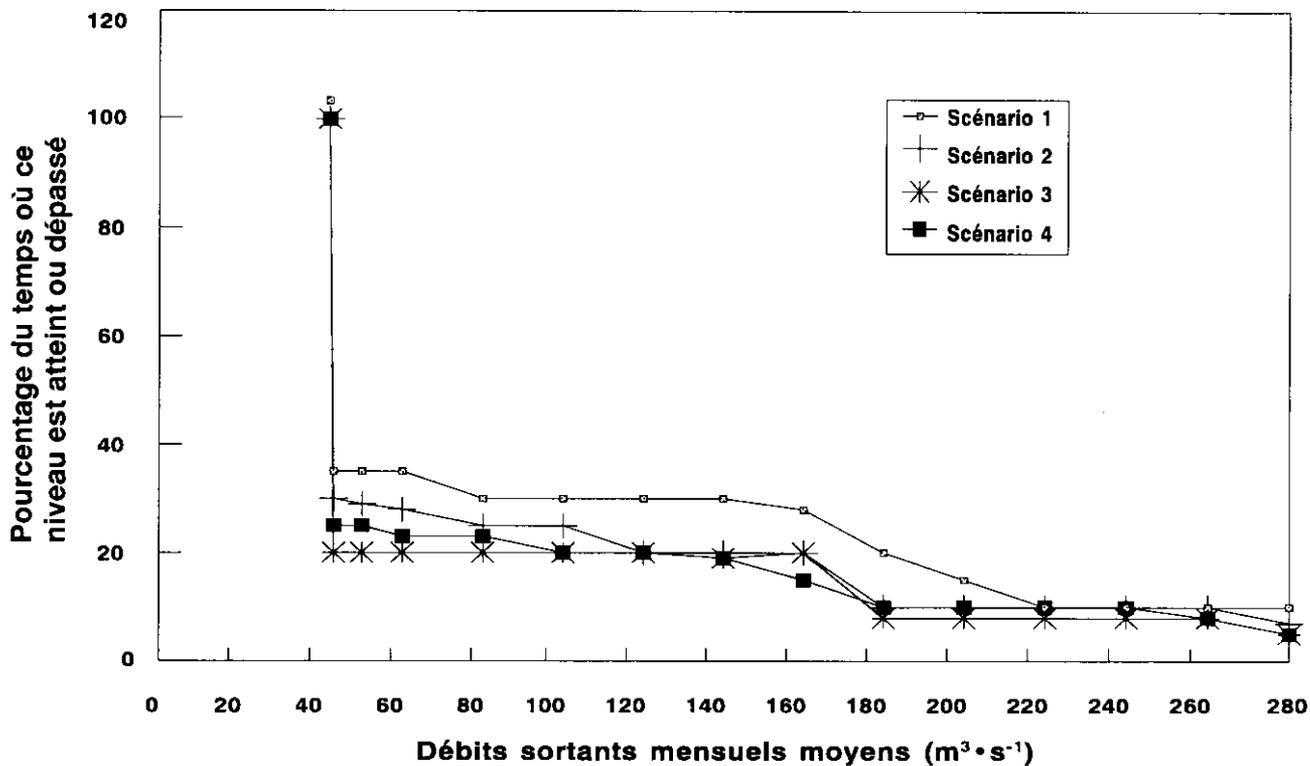


Figure 25. Débits sortants mensuels en septembre du lac Diefenbaker.

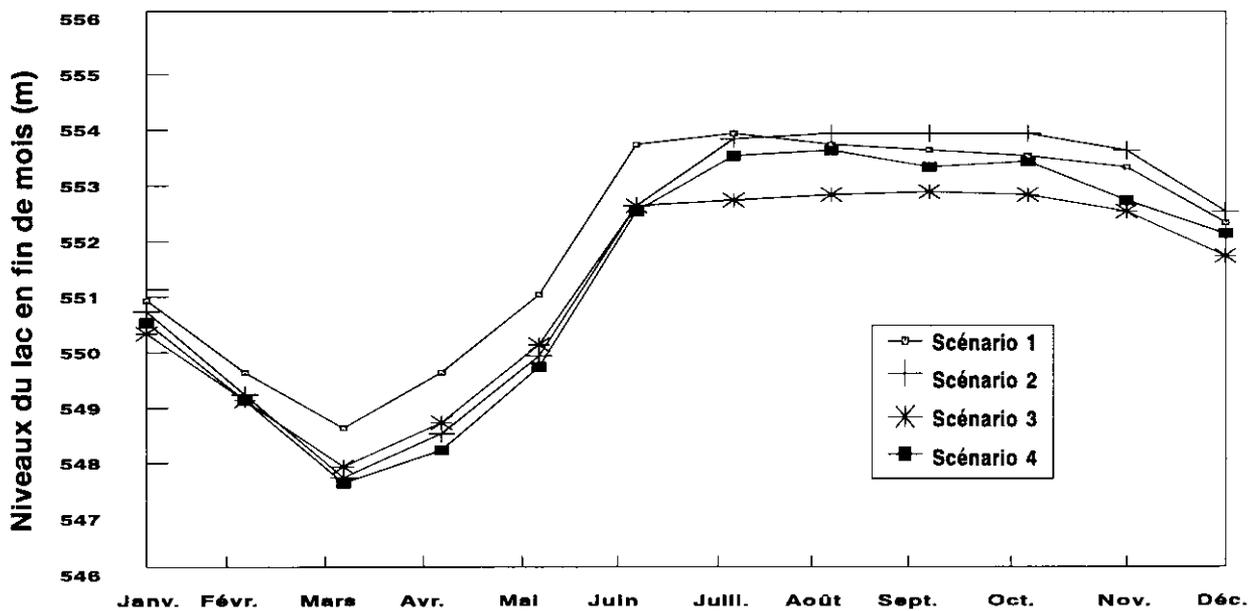


Figure 26. Niveaux moyens en fin de mois du lac Diefenbaker.

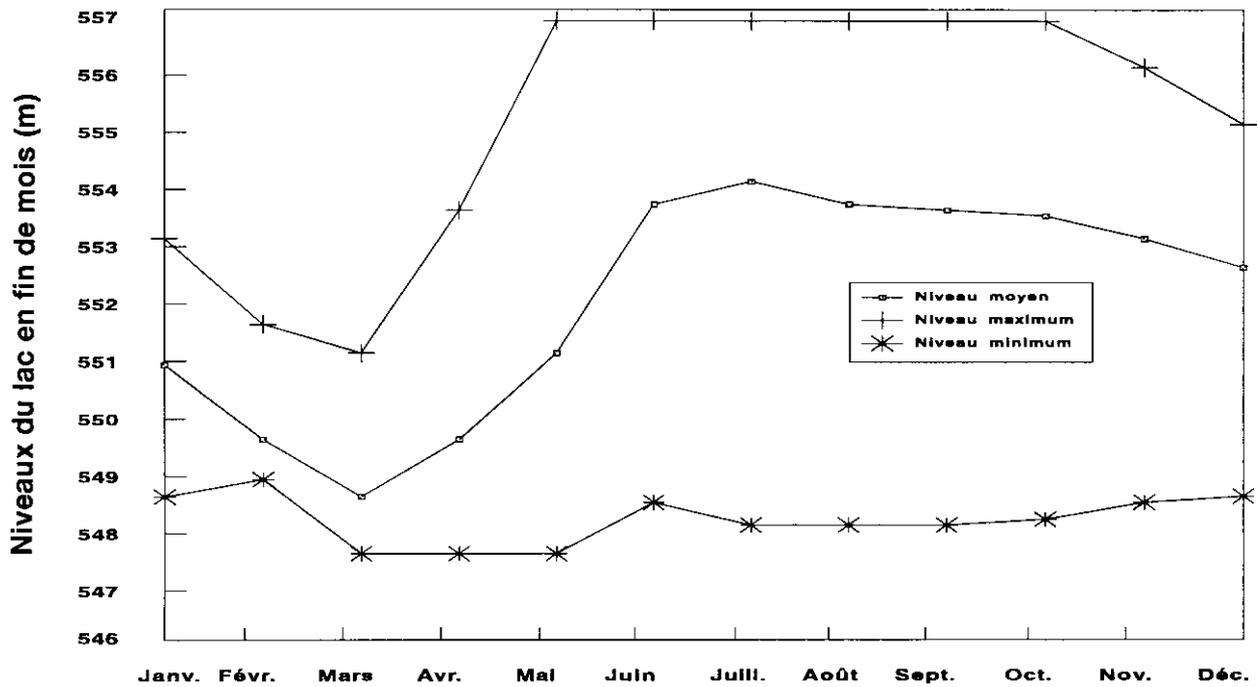


Figure 27. Niveaux du lac Diefenbaker en fin de mois pour le scénario 1.

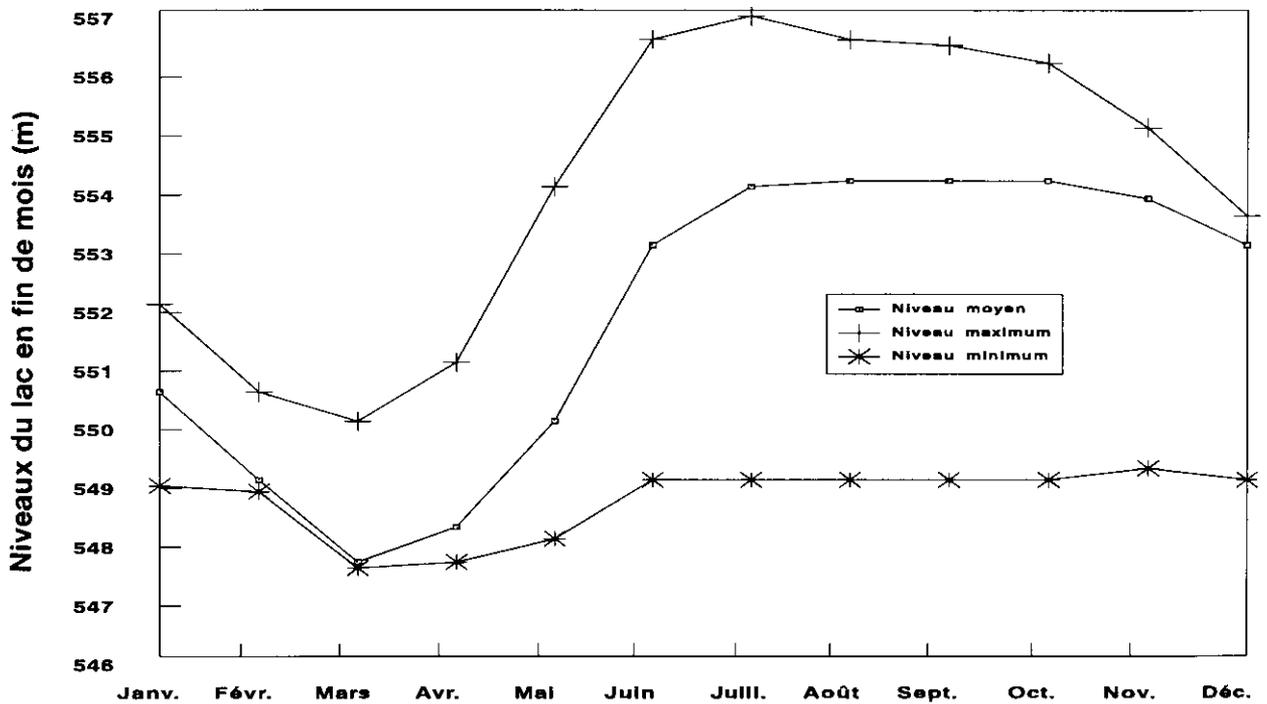


Figure 28. Niveaux du lac Diefenbaker en fin de mois pour le scénario 2.

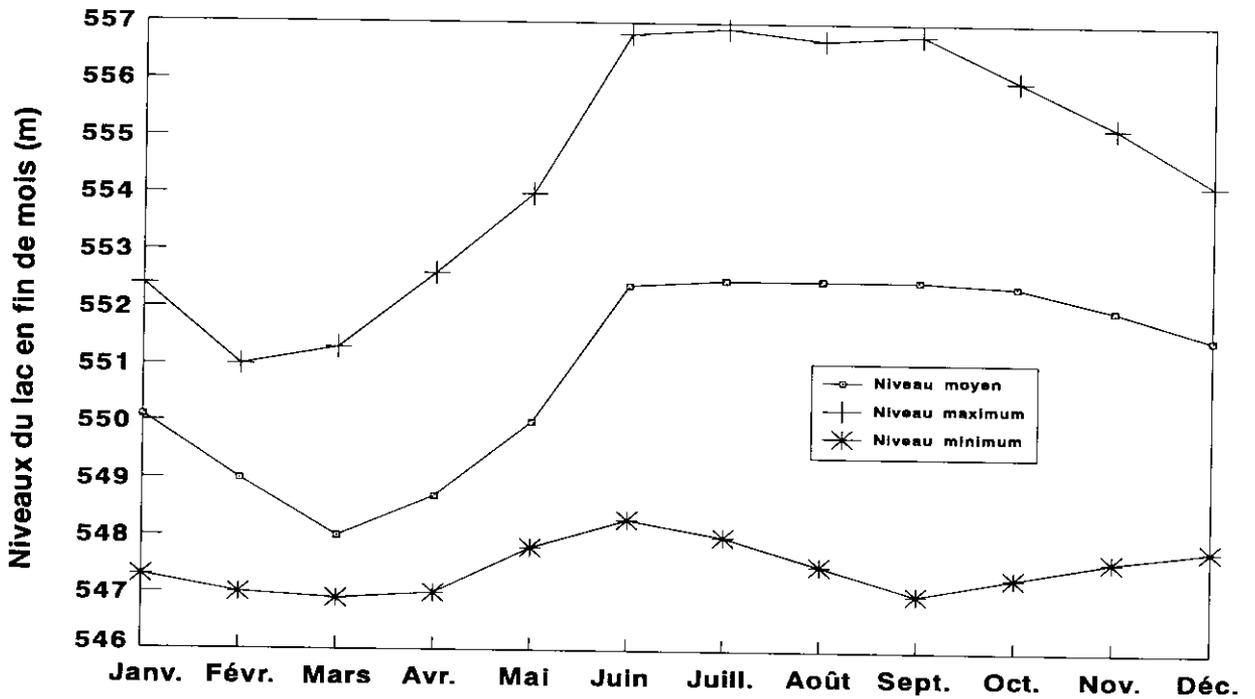


Figure 29. Niveaux du lac Diefenbaker en fin de mois pour le scénario 3.

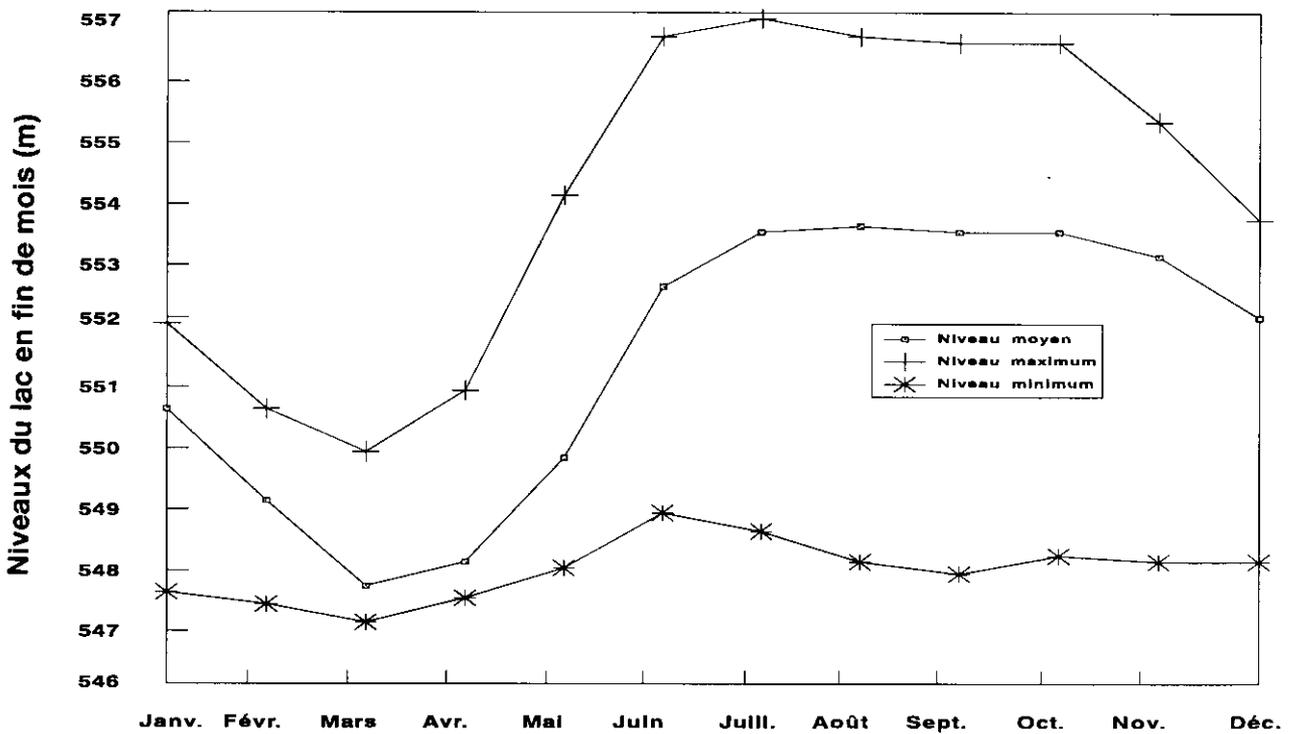


Figure 30. Niveaux du lac Diefenbaker en fin de mois pour le scénario 4.

d'irrigation en Saskatchewan et sur les répercussions pour le lac Diefenbaker de cette utilisation et des usages qui sont faits de l'eau en Alberta. Le tableau 28 récapitule les scénarios :

Les données ayant servi à établir la courbe des niveaux optimaux et les contraintes d'exploitation du lac Diefenbaker dont il est question dans l'analyse ont été extrapolées de diverses sources puisque les données officielles n'étaient pas suffisantes. Les mêmes séries de taux de croissance de l'utilisation attribuable aux municipalités, à l'industrie et au bétail ont été employées dans tous les scénarios. Il n'a pas été réalisé de simulations des conditions actuelles puisque l'on n'avait pas assez de données sur l'écoulement correspondant au noeud frontalier.

Les simulations portaient sur quatre noeuds du bassin de la rivière Saskatchewan Sud qui figuraient déjà dans la base de données actuelle du WUAM ainsi que sur le noeud de la frontière entre l'Alberta et la Saskatchewan. Puisque l'on disposait de la majeure partie des données, la réalisation des simulations n'a nécessité qu'un minimum d'efforts portant principalement sur la sélection des scénarios et les traitements informatiques mêmes.

Les simulations WUAM ont permis de présenter les résultats suivants :

- 1) Les prélèvements d'eau (prise d'eau et consommation) par secteur : utilisation industrielle, urbaine, rurale, abreuvement du bétail et irrigation moyenne.

- 2) L'utilisation de l'eau à des fins d'irrigation par zone d'irrigation, par noeud et pour l'ensemble du bassin dans des conditions moyennes, sèches et pluvieuses, cette utilisation étant également présentée sous la forme d'un diagramme de fréquence.
- 3) Le lac Diefenbaker
 - a) consommation totale d'eau (irrigation, évaporation et dérivation de Qu'Appelle) pour des années moyennes, extrêmement sèches et extrêmement pluvieuses, cette consommation étant également présentée sous la forme d'un diagramme de fréquence
 - b) résumé statistique des niveaux du réservoir et des débits sortants
 - c) diagrammes de fréquence des niveaux du réservoir et des débits sortants pour des mois choisis
 - d) niveaux du réservoir en fin de mois : moyen, maximum et minimum.

L'étude a débouché sur les observations principales suivantes :

- 1) L'irrigation constitue de loin le principal facteur d'utilisation de l'eau dans le bassin pour les deux séries de scénarios ayant fait l'objet d'une simulation (en négligeant la dérivation de Qu'Appelle et l'évaporation au-dessus du lac Diefenbaker) puisqu'elle est

Tableau 28
Résumé des scénarios

Numéro du scénario	Zone irriguée (ha)		Utilisation de l'eau en Alberta	Période de simulation (années)	
	Total	Superficie alimentée directement par le lac Diefenbaker		Irrigation	Bilan hydrologique
1	76 300	58 500	Cas de référence	71 (1912-1982)	28 (1928-1955)
2	76 300	58 500	50 % des écoulements naturels	71 (1912-1982)	56 (1912-1967)
3	142 600	121 800	Forte irrigation	71 (1912-1982)	28 (1928-1955)
4	142 600	121 800	50 % des écoulements naturels	71 (1912-1982)	56 (1912-1967)

à l'origine de 90 % et 94 % de la prise totale d'eau (94 % et 97 % de la consommation).

- 2) Les quantités moyennes d'eau prélevée dans le bassin à des fins d'irrigation dans le cadre des deux séries de scénarios s'établissent à 420 Mm³ et à 790 Mm³ (soit approximativement 5,5 dam³·ha⁻¹) sur lesquels 313 Mm³ (75 %) et 665 Mm³ (85 %) respectivement proviennent directement du lac Diefenbaker.
- 3) Il ne convient pas de fonder les calculs, comme cela se fait habituellement dans nombre d'études de planification d'un bassin hydrographique, sur une moyenne d'utilisation à des fins d'irrigation. L'analyse révèle en effet que a) rien qu'en ce qui concerne les fluctuations des précipitations, les prélèvements d'eau à des fins d'irrigation pourraient varier entre 3,4 et 7,6 dam³·ha⁻¹ (pour un même niveau d'irrigation de 60 %) et que b) l'utilisation moyenne d'eau à des fins d'irrigation, qui est de 5,5 dam³·ha⁻¹, sera dépassée environ 60 % du temps. Les analyses effectuées en fonction de conditions moyennes pourraient donc déboucher sur des conclusions erronées. Ce problème ne se manifeste pas dans les simulations WUAM, qui se basent sur les archives climatiques correspondant à une période donnée et produisent des informations sur la fiabilité du système et les risques d'échec.
- 4) On estime que le prélèvement moyen combiné de l'irrigation et de l'évaporation dans le réservoir est de 525 Mm³ et 880 Mm³ respectivement pour les scénarios du cas de référence et de forte irrigation. La fourchette effective est toutefois de 263 à 670 Mm³ pour le scénario du cas de référence et de 480 à 1 150 Mm³ pour le scénario de forte irrigation. L'utilisation réelle sera supérieure à la moyenne environ 60 % du temps.
- 5) Le niveau qu'il faut maintenir dans le réservoir pour que celui-ci puisse servir à des usages récréatifs (c.-à-d. 555,3 m) pourra

l'être de 21 % à 39 % du temps, selon le scénario.

- 6) Les simulations montrent également que l'on parviendra toujours à maintenir les débits minimaux nécessaires à l'utilisation *in situ* du cours d'eau en aval du barrage Gardiner (c.-à-d. 42,5 m³·s⁻¹).

Les résultats des simulations effectuées au sujet du lac Diefenbaker étaient pour l'essentiel fonction des hypothèses posées, notamment en ce qui concerne les contraintes et les règles d'exploitation du réservoir, et devraient donc être examinés en conséquence. Il est toutefois intéressant de noter qu'en dépit des différences qui caractérisaient les scénarios de développement sur lesquels on s'est appuyé, les conclusions générales auxquelles la présente étude a permis d'aboutir en ce qui concerne le lac Diefenbaker étaient similaires à celles auxquelles est parvenue l'Étude Canada-Saskatchewan du bassin de la rivière Saskatchewan Sud (Environnement Canada-SaskWater, 1991), puisque l'on a dans les deux cas déterminé que les niveaux de la retenue seront considérablement inférieurs à ceux que nécessitent des usages récréatifs.

Ce rapport ne présente qu'une seule des applications du WUAM à la planification des bassins hydrographiques, et les analyses effectuées ne couvrent en aucune manière l'intégralité des capacités du modèle. Par exemple, nous n'avons pas exploité toutes les possibilités du modèle en ce qui concerne l'analyse de l'utilisation de l'eau, sauf pour l'irrigation, et cela n'a été fait que partiellement même dans ce cas. Le sous-modèle de l'irrigation est extrêmement souple, ce qui permet de faire varier la quasi-totalité des paramètres d'utilisation de l'eau à des fins d'irrigation, soit séparément, soit en combinaison, notamment en ce qui a trait à l'évolution de la répartition des cultures, aux améliorations apportées à l'irrigation, à l'incidence des changements dans les niveaux d'irrigation, à celle de la transformation du climat, etc.

Le modèle a également été appliqué à plusieurs autres bassins hydrographiques du Canada :

- au bassin de la rivière Saint-François, au Québec (Paquin, 1990)
- au bassin de la rivière Yamaska, au Québec (Harris, 1990)
- au bassin de la rivière Similkameen, en Colombie-Britannique (McNeill, 1991)
- au bassin de la rivière l'Assomption, au Québec (Doneys et Dubois, 1991a)
- au bassin de la rivière Saint-Maurice, au Québec (Doneys et Dubois, 1991b)

Le WUAM pourrait notamment servir dans le cadre des études suivantes :

- 1) Les limites que les approvisionnements en eau imposent au développement économique. Puisqu'il permet de prévoir l'utilisation qui sera faite de l'eau d'un point de vue multisectoriel, le WUAM se prête à des études des quantités d'eau disponibles et des contraintes hydrologiques pour la quasi-totalité des formes de développement économique.
- 2) La conservation de l'eau. Les divers paliers de gouvernement ont imprimé une nouvelle orientation à la gestion des ressources hydrologiques en accordant une importance considérable à la gestion de la demande. Le WUAM constitue un excellent outil d'étude des répercussions sur la demande qui prévaudra à l'avenir de diverses mesures de conservation comme la tarification de l'eau, son recyclage et son mesurage par des compteurs, entre autres.
- 3) L'incidence de la transformation du climat. La détermination des répercussions de la transformation du climat sur l'utilisation future de l'eau et l'équilibre entre l'offre et la consommation représente un des grands domaines d'application potentielle du WUAM. Des recherches substantielles sont effectuées dans le monde entier sur la théorie

du réchauffement du climat planétaire et sur son incidence probable sur les précipitations, l'évaporation, l'évapotranspiration, etc. Le WUAM offre un moyen unique de combiner les résultats de telles études et de les exprimer en termes d'incidence sur l'utilisation de l'eau et le bilan hydrologique.

- 4) Les bassins transfrontaliers. Le fait que le WUAM permette d'analyser la répartition des écoulements aux frontières de régions sur lesquelles s'exerce la compétence d'administrations différentes permet de l'employer dans le cadre d'études internationales et interprovinciales de bassins hydrographiques. Il peut servir à quantifier les conséquences de certains aménagements ou de la croissance de différents secteurs du point de vue des accords internationaux et interprovinciaux de répartition des ressources en eau.

5. RÉFÉRENCES

- Acres International Limited. 1986. Water supply constraints to energy development. Phase V. Summary report. Document non publié préparé pour la Direction générale des eaux intérieures, Environnement Canada, Ottawa.
- Acres International Limited. 1987. Water supply constraints to energy development. Phase VI. Summary report. Document non publié préparé pour la Direction générale des eaux intérieures, Environnement Canada, Ottawa.
- Alberta Environment. 1984. South Saskatchewan River Basin Planning Program. Water Resources Management Services, Planning Division, Edmonton.
- Blain, R.J. et D.R. Richards. 1982a. 1979 Operation of the Saskatchewan River system. Hydrology Branch, Saskatchewan Environment. Rapport interne.
- Blain, R.J. et D.R. Richards. 1982b. 1980 Operation of the Saskatchewan River system. Hydrology Branch, Saskatchewan Environment. Rapport interne.
- Blain R.J. et D.R. Richards. 1984a. 1981 Operation of the Saskatchewan River system. Hydrology Branch, Saskatchewan Environment. Rapport interne.
- Blain R.J. et D.R. Richards. 1984b. 1982 Operation of the Saskatchewan River system. Hydrology Branch, Saskatchewan Environment. Rapport interne.
- Conseil économique du Canada. 1981. Modèle Candide, modèle 2.0.
- Doneys, E. et L. Dubois. 1991a. Application du modèle d'analyse d'utilisation de l'eau au bassin de la rivière

- l'Assomption. Environnement Canada, région du Québec.
- Doneys, E. et L. Dubois. 1991b. Application du modèle d'analyse d'utilisation de l'eau au bassin de la rivière Saint-Maurice. Environnement Canada, région du Québec.
- Environnement Canada-SaskWater. 1991. Étude Canada-Saskatchewan du bassin de la rivière Saskatchewan Sud, Rapport final.
- Harris, J. 1990. Application du modèle d'analyse d'utilisation de l'eau au bassin de la rivière Yamaska. Environnement Canada, région du Québec.
- Hobbs, E.H. et K.K. Krogman. 1983. Scheduling irrigation to meet crop demand. Agriculture Canada.
- Kassem, A. 1992. The Water Use Analysis Model (WUAM) program documentation and reference manual. Direction de la conservation et de l'économie, Direction générale des sciences et de l'évaluation des écosystèmes, Environnement Canada, Ottawa.
- McNeill, R. 1991. Supply and demand for water in the Similkameen River basin. Environnement Canada, région du Pacifique et du Yukon, Vancouver.
- Paquin, J. 1990. Application du modèle d'analyse d'utilisation de l'eau au bassin de la rivière Saint-François. Environnement Canada, région du Québec.
- Pohjakas, K. 1981. Evaluation of center pivot irrigation practices in Alberta. 1981 Pacific Northwest Regional Meeting, Société canadienne de génie rural.
- Saskatchewan Water Corporation. 1987. Lake Diefenbaker water use.
- Tate, D.M. et D.M. Lacelle. 1987. Utilisation de l'eau dans les municipalités du Canada, 1983. Étude n° 20, Collection des sciences sociales. Direction de la planification et de la gestion des eaux, Direction générale des eaux intérieures, Environnement Canada, Ottawa.
- Tate, D.M. et D.N. Scharf. 1985. Utilisation de l'eau dans les industries du Canada, 1981. Étude n° 19, Collection des sciences sociales. Direction de la planification et de la gestion des eaux, Direction générale des eaux intérieures, Environnement Canada, Ottawa.

Annexe A

Aperçu du modèle d'analyse d'utilisation de l'eau (WUAM)

A.1 APERÇU

La figure A-1 présente un aperçu général du concept du modèle d'analyse d'utilisation de l'eau (WUAM). Fondamentalement, ce modèle comporte trois éléments principaux : l'utilisation de l'eau, l'apport d'eau et le bilan hydrologique. Le tableau A-1 décrit brièvement chacun de ces éléments en plus d'indiquer quels sont les besoins en données primaires.

La prévision de l'utilisation de l'eau constitue l'objectif principal du modèle ainsi qu'un élément majeur de celui-ci. Les utilisations de l'eau se répartissent entre celles qui supposent un prélèvement (ou consommation) et celles qui n'en nécessitent pas (ou utilisations *in situ*). Les utilisations qui supposent un prélèvement sont classées en cinq catégories principales : consommation urbaine, consommation industrielle, irrigation, abreuvement du bétail et production d'électricité. Une catégorie supplémentaire d'utilisation de l'eau classée sous la rubrique *aménagements spéciaux* a également été incorporée au modèle. Elle a été instituée à l'origine afin de simuler les utilisations de l'eau dans le cadre des grands projets énergétiques mais elle peut aussi servir à comptabiliser les utilisations qui n'entrent pas dans les cinq catégories principales. Les utilisations de l'eau qui ne nécessitent pas de prélèvement, par exemple les loisirs, la dilution des déchets, etc., sont traitées comme des contraintes s'exerçant sur l'écoulement en fonction des débits minimums qui doivent être respectés.

La deuxième grande partie du modèle traite des apports d'eau qui sont simulés sur la base de

séries chronologiques de données sur l'écoulement naturel¹ à des points choisis du bassin versant. Les ressources en eau souterraine sont prises en compte grâce à des méthodes spéciales uniquement. Un sous-élément de simulation du réservoir, que l'on fait fonctionner en conjonction avec le modèle des utilisations de l'eau, simule les effets de la régularisation sur la disponibilité de l'eau et permet d'examiner les politiques d'exploitation d'un réservoir donné dans le contexte de l'utilisation de l'eau à l'échelle d'une région. Il permet également de donner à l'intérieur d'un réseau une fonction dynamique au réservoir afin d'atténuer les pénuries d'eau lorsque c'est possible.

Le troisième élément du modèle est un algorithme qui compare les usages prévus de l'eau et les quantités disponibles. Cette comparaison est effectuée pour une longue période pour laquelle on dispose de données hydrologiques (données historiques). Entre autres nombreux détails, le modèle fournit des statistiques au sujet de la gravité et de la fréquence des pénuries d'eau, si de telles pénuries sont survenues.

Grâce au WUAM, il est également possible d'étudier plusieurs questions de gestion de l'eau, et notamment

- l'incidence de la tarification de l'eau sur la demande
- les dérivations d'eau et le stockage en dehors du cours d'eau

¹ L'écoulement est dit «naturel» lorsqu'il n'est pas modifié par des ouvrages de régularisation ou par des prélèvements/une consommation d'eau.

Water Use

Water Supply

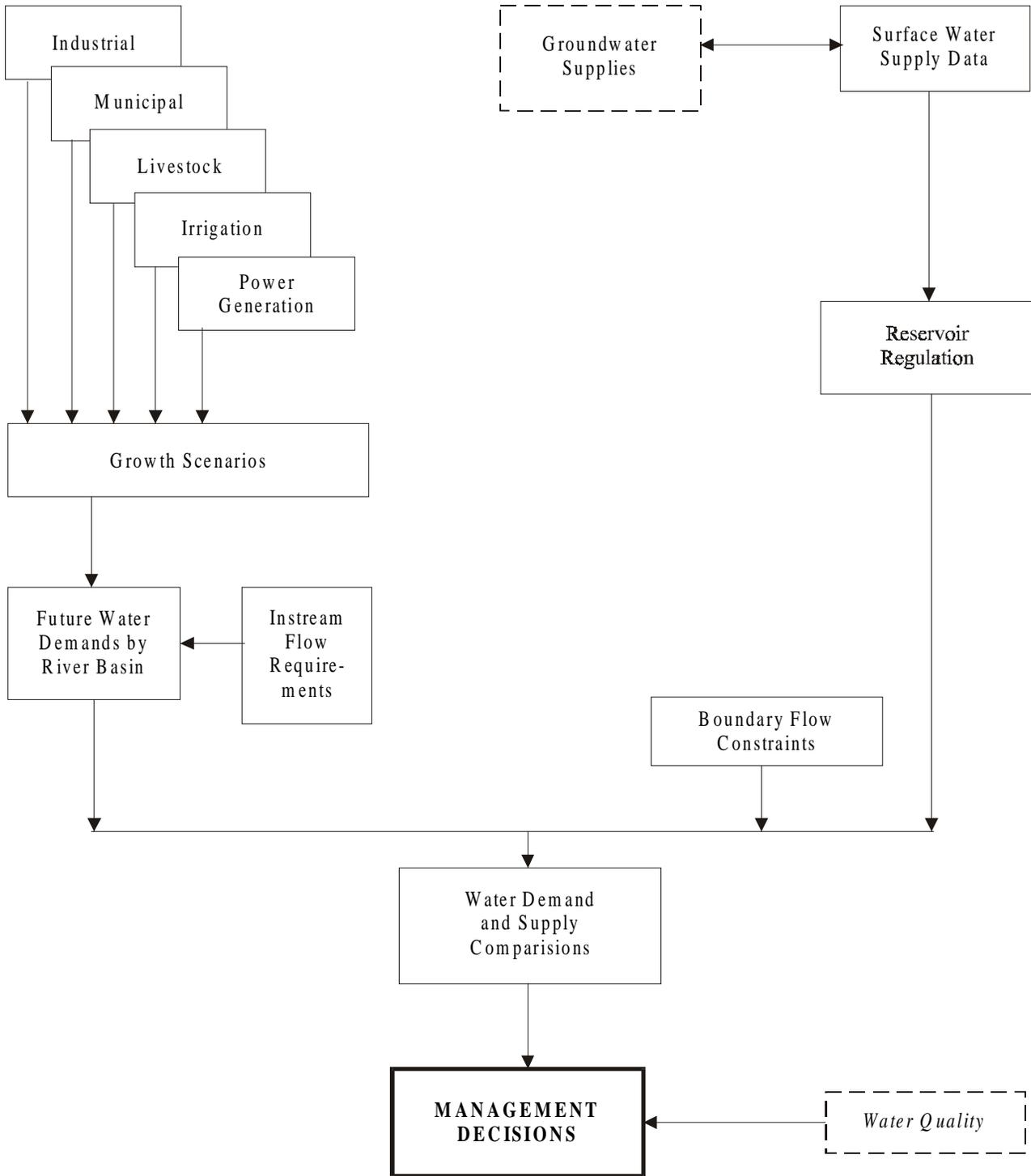


Figure A-1. Conceptual overview of the Water Use Analysis Model (WUAM).

Tableau A-1. Principaux éléments du modèle d'analyse d'utilisation de l'eau

Élément	Objectif/description	Principale série de données
UTILISATION DE L'EAU		
Zones urbaines	<ul style="list-style-type: none"> - prévisions relatives à l'utilisation urbaine de l'eau par bassin secondaire - les utilisations, la population et la tarification de l'eau en tant que variables principales - les catégories peuvent être distinguées, p. ex. secteur résidentiel, commercial, public, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> - population par bassin hydrographique durant l'année de référence - taux d'utilisation de l'eau par catégorie - données du scénario concernant la croissance démographique - taux futurs d'utilisation de l'eau - données sur la tarification
Zones rurales	<ul style="list-style-type: none"> - prévisions concernant les utilisations rurales de l'eau par bassin secondaire 	<ul style="list-style-type: none"> - population rurale par bassin hydrographique - taux d'utilisation rurale de l'eau - scénarios concernant la croissance démographique en milieu rural
Industrielle	<ul style="list-style-type: none"> - prévisions relatives aux utilisations industrielles de l'eau par bassin secondaire et par rapport à la Classification type des industries à deux, trois et quatre chiffres - le modèle tient compte du niveau de production, des méthodes d'utilisation de l'eau, de la répartition de l'industrie et de la tarification de l'eau - le modèle emploie des techniques d'analyse intrants-extrants en ce qui concerne la croissance et l'évolution technologique 	<ul style="list-style-type: none"> - données sur l'utilisation de l'eau durant l'année de référence par secteur industriel et par bassin secondaire - scénarios de croissance économique - courbes de la demande en eau par secteur industriel - tableaux d'analyse intrants-extrants au palier provincial
Centrales thermiques	<ul style="list-style-type: none"> - le modèle calcule pour chaque mois quelle est la quantité d'eau utilisée pour chacune des centrales thermiques incorporées à la simulation 	<ul style="list-style-type: none"> - données concernant la production mensuelle d'énergie pour toute une série de conditions hydrologiques à chaque centrale - coefficients de prélèvement de l'eau et de consommation pour chaque centrale OU caractéristiques des centrales : type de combustible, type de circuit de refroidissement, type de condensateur
Centrales hydroélectriques	<ul style="list-style-type: none"> - le modèle évalue la production d'énergie hydroélectrique à partir d'écoulements simulés dans les centrales 	<ul style="list-style-type: none"> - hauteur de chute brute et efficacité à chaque centrale
Irrigation	<ul style="list-style-type: none"> - le modèle simule l'utilisation de l'eau à des fins d'irrigation par district/zone d'irrigation - le modèle s'appuie sur les antécédents climatiques (précipitations et évapotranspiration) - le modèle calcule les quantités d'eau détournées par les dérivations et les écoulements restitués - le modèle lie les zones d'irrigation au réseau WUAM sur la base de leur répartition spatiale 	<ul style="list-style-type: none"> - zone d'irrigation - emplacement à l'intérieur du réseau de noeuds d'apport et de noeuds d'écoulement restitué - précipitations passées - évapotranspiration passée - données/paramètres concernant les cultures - données/paramètres concernant les sols - paramètres d'exploitation
Cheptel	<ul style="list-style-type: none"> - prévisions relatives à l'utilisation d'eau pour l'abreuvement du cheptel par type d'animaux et bassin secondaire 	<ul style="list-style-type: none"> - population animale par type et bassin secondaire - coefficients d'utilisation de l'eau par type d'animal - scénarios relatifs à la croissance des populations animales

Table A-1. Suite

Élément	Objectif/description	Principale série de données
Évaporation	<ul style="list-style-type: none"> - dans les réservoirs - en fonction de la superficie du réservoir et des taux d'évaporation passée 	<ul style="list-style-type: none"> - calculée par sous-modèle de simulation de réservoir
Utilisations <i>in situ</i>	<ul style="list-style-type: none"> - le modèle compare les écoulements simulés et les écoulements minimums nécessaires aux utilisations <i>in situ</i> - le modèle calcule la fréquence des écarts par rapport à l'écoulement nécessaire aux utilisations <i>in situ</i> ainsi que la gravité du problème 	<ul style="list-style-type: none"> - écoulements mensuels minimums nécessaires aux utilisations <i>in situ</i> du cours d'eau
APPORTS D'EAU		
Eaux de surface	<ul style="list-style-type: none"> - dans des conditions où l'écoulement est naturel 	<ul style="list-style-type: none"> - archives relatives à l'écoulement naturel mensuel à chaque noeud
Eaux souterraines	<ul style="list-style-type: none"> - le modèle ajuste les données relatives à l'utilisation de l'eau afin d'éliminer les activités pour lesquelles l'eau est puisée dans la nappe phréatique - le modèle suppose que la même proportion (d'activités alimentées par des eaux souterraines par rapport au total des utilisations) s'appliquera à l'avenir - le modèle ne tient pas compte des liens entre les eaux de surface et les eaux souterraines 	<ul style="list-style-type: none"> - données sur l'usage qui est fait des eaux souterraines par type d'utilisation
Simulation de réservoir	<ul style="list-style-type: none"> - le modèle fait l'historique des niveaux du réservoir et des quantités évacuées - le modèle calcule la perte due à l'évaporation en fonction de la superficie 	<ul style="list-style-type: none"> - courbes des niveaux optimaux du réservoir et contraintes d'exploitation - étape-stockage-superficie
AUTRES CARACTÉRISTIQUES		
Stockage hors du cours d'eau	<ul style="list-style-type: none"> - le modèle ajuste les prélèvements en fonction des quantités stockées hors du cours d'eau 	<ul style="list-style-type: none"> - quantité stockée mensuellement (%)
Tarification de l'eau	<ul style="list-style-type: none"> - le modèle permet d'étudier les répercussions de toute modification de la tarification de l'eau sur la demande des secteurs urbain et industriel 	<ul style="list-style-type: none"> - courbes de la demande en eau (quantité d'eau utilisée par rapport au tarif fixé) - élasticité par rapport aux prix
Dérivations	<ul style="list-style-type: none"> - le modèle incorpore les effets des transferts entre les bassins ou à l'intérieur de ceux-ci 	<ul style="list-style-type: none"> - l'utilisateur indique quels sont les écoulements mensuels dans la dérivation
Répartition entre des territoires administratifs	<ul style="list-style-type: none"> - le modèle examine les effets des dispositions administratives prises au sujet de la manière dont l'écoulement doit être partagé 	<ul style="list-style-type: none"> - les données concernant les écoulements mensuels minimums sont fournies par l'utilisateur
Priorités d'utilisation, rationnement et coupures	<ul style="list-style-type: none"> - le modèle permet d'analyser la méthode de rationnement recommandée en cas de pénurie 	<ul style="list-style-type: none"> - les priorités d'utilisation sont établies sur la base des méthodes en vigueur dans la province

- la répartition des écoulements entre plusieurs administrations
- le problème du rationnement de l'eau et des restrictions imposées à la consommation lorsque les quantités disponibles ne suffisent plus.

A.2 LE CONCEPT

Tous les calculs du modèle sont exécutés pour le bassin hydrographique ou le bassin secondaire à des intervalles mensuels. Dans le cadre de la modélisation, un bassin peut être n'importe quelle zone mise à l'étude. Un bassin peut être subdivisé en un certain nombre de bassins secondaires. La délimitation de bassins secondaires n'est assujettie qu'à une seule contrainte, tout point de mesure d'un écoulement doit se trouver au débouché du bassin secondaire ou à proximité de celui-ci. Pour cette raison, on définit généralement un bassin secondaire comme un bassin de drainage qui est situé au-dessus d'un point donné de jauge hydrologique. Dans le cadre de la terminologie employée en recherche opérationnelle, on dit que le bassin constitue un *réseau* et que les bassins secondaires ou points de jauge sont les *noeuds* du réseau.

Pour illustrer le fonctionnement du modèle, on se réfère à la figure A-2, qui délimite le bassin de la rivière Saskatchewan dans l'ouest du Canada. La première étape de modélisation WUAM consiste à sélectionner des points d'étude. Il s'agit des points pour lesquels on obtiendra des prévisions d'utilisation de l'eau et des données sur le bilan hydrologique. Il faut représenter les points clés comme, par exemple, les frontières administratives, les réservoirs (existants ou qui seront ultérieurement aménagés) et l'emplacement de toute dérivation d'eau ou installation utilisant des quantités notables d'eau qui existe ou dont l'aménagement est prévu.

Dans le cadre de la modélisation, le bassin (figure A-2) est représenté comme un réseau (figure A-3). Ce réseau est constitué de

- noeuds, qui correspondent aux bassins secondaires

- liens, qui indiquent le trajet que suit l'écoulement entre les noeuds
- zones d'irrigation

Les zones d'irrigation sont définies indépendamment des bassins secondaires parce qu'elles sont rarement circonscrites à l'intérieur d'un seul d'entre eux. On rattache ces zones d'irrigation en définissant quels sont les noeuds d'approvisionnement et les noeuds de restitution de l'écoulement. Il est possible d'intégrer au réseau des noeuds imaginaires qui matérialisent des éléments spécifiques comme les réservoirs, les ouvrages de dérivation, les limites entre les territoires administratifs, etc.

A.3 MÉTHODES DES CALCULS

Lors de la préparation du modèle, l'utilisateur précise quelle est, dans la région étudiée, la relation hiérarchique entre les bassins secondaires et les zones d'irrigation qui s'y trouvent. Le réseau doit être dendritique et converger vers l'aval. Initialement, on établit des prévisions d'utilisation de l'eau pour chaque noeud (voir partie suivante) sur la base des hypothèses posées par l'utilisateur au sujet de l'avenir. Le modèle effectue des calculs de bilan hydrologique en commençant par les noeuds amont et en progressant en cascade vers l'aval. On traite l'intégralité du réseau d'une zone d'étude pour un horizon temporel donné avant d'aborder la période suivante. Deux paramètres principaux d'utilisation de l'eau sont établis. Le premier est la prise d'eau, c'est-à-dire la quantité d'eau qui est prélevée pour un usage spécifique et qui est partiellement restituée. Le deuxième paramètre est la consommation d'eau, qui correspond à la différence entre la quantité prélevée et l'écoulement restitué.

La figure A-4 illustre en détail la manière dont les calculs sont effectués pour chaque noeud. À chacun d'eux, les utilisations prévues de l'eau sont comparées aux quantités disponibles. Tout surplus d'eau est transféré au noeud aval suivant. Lorsqu'il constate que les quantités d'eau disponibles ne suffisent pas à répondre aux

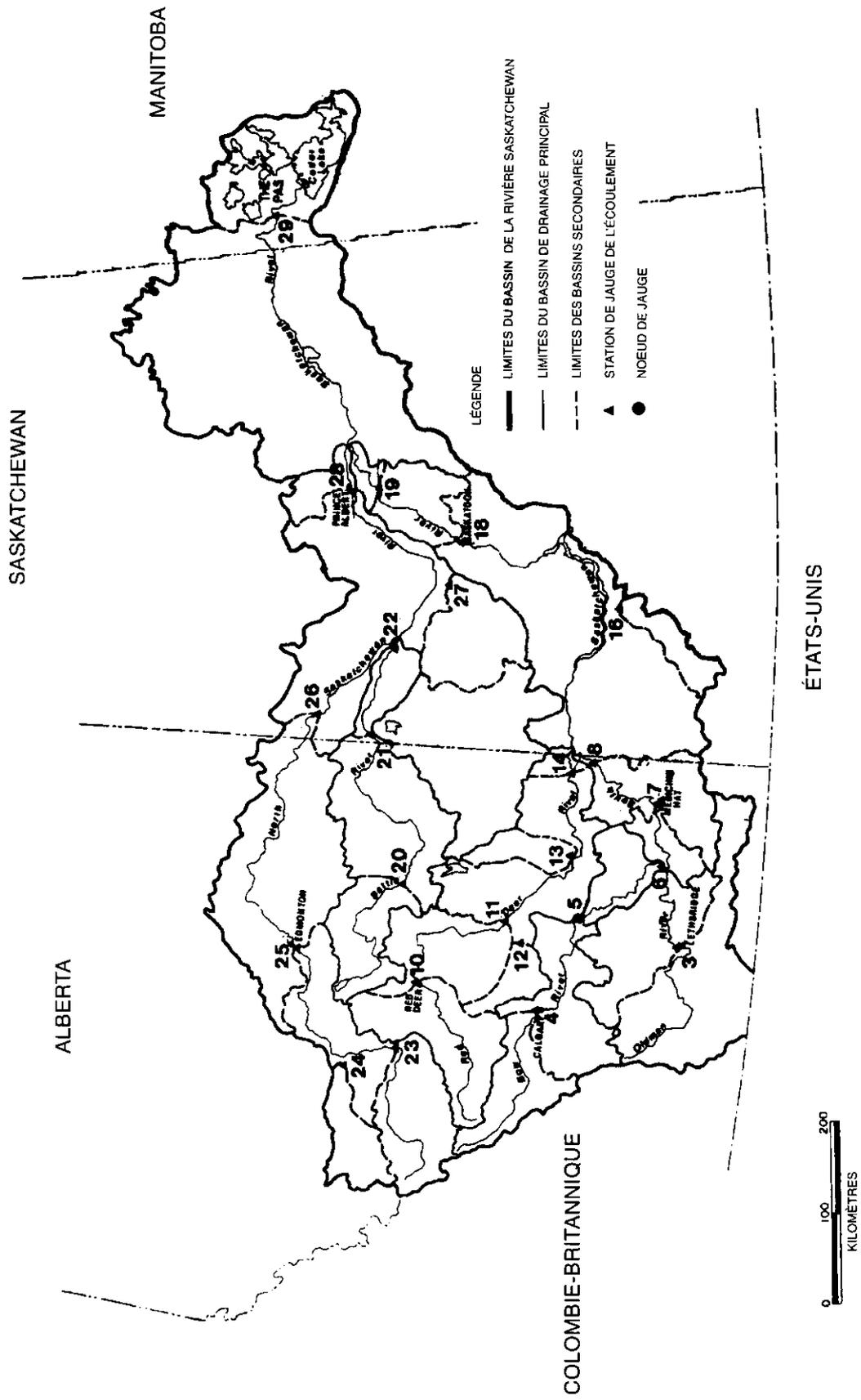


Figure A-2. Bassins secondaires et stations de jaugeage dans le bassin de la rivière Saskatchewan.

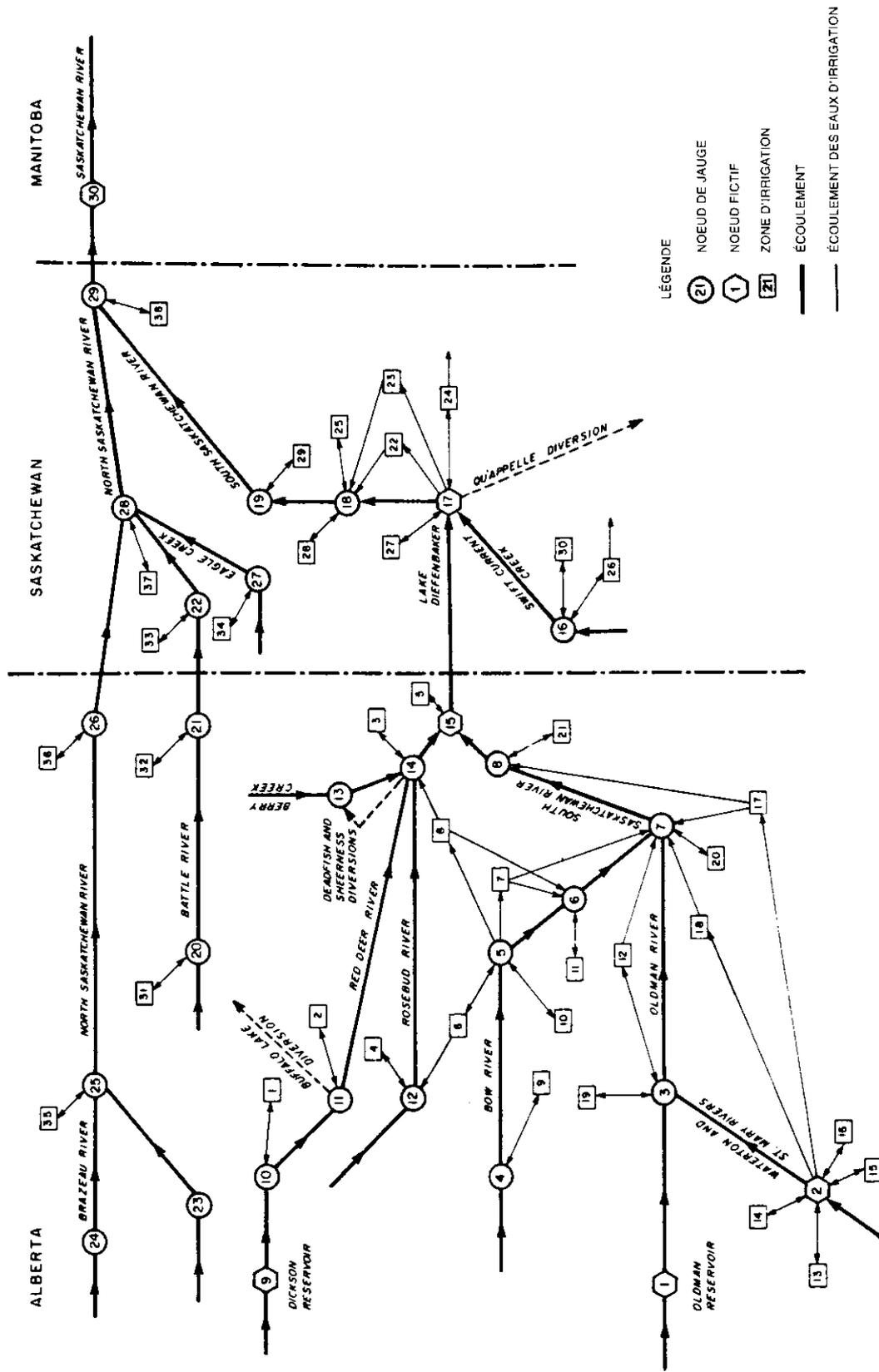


Figure A-3. Le réseau d'écoulement WUAM du bassin de la rivière Saskatchewan.

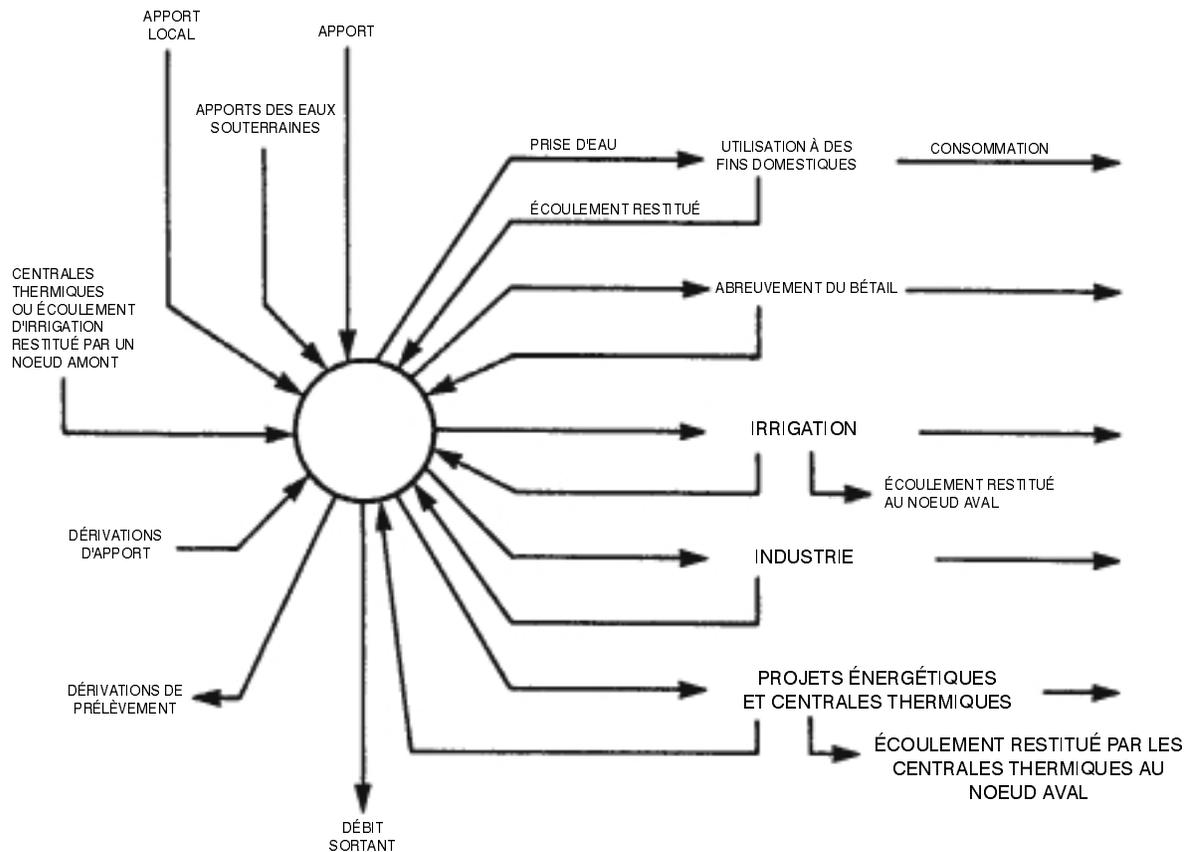


Figure A-4. Calcul détaillé à chaque noeud.

besoins prévus d'un noeud donné, le modèle tente tout d'abord d'éliminer le déficit en augmentant la quantité d'eau libérée par les réservoirs amont, si les règles d'exploitation de ceux-ci le permettent. Dans le cas contraire, il recommande l'instauration de mesures de rationnement et de restriction de la consommation en fonction d'un système de répartition de l'eau par priorités qui est précisé par l'utilisateur.

L'utilisateur indique également quels sont les écoulements mensuels qui doivent être maintenus pour permettre des utilisations *in situ* du cours d'eau. Cette information peut être fournie à n'importe quel noeud du réseau. Le modèle calcule le débit sortant net d'un bassin secondaire en déterminant quelle est la différence entre les quantités disponibles et le total de la consommation à l'intérieur du bassin secondaire.

Ce débit sortant est ensuite comparé avec les écoulements minimums qui ont été spécifiés par l'utilisateur. Tout écart est donc signalé d'une façon qui en révèle la gravité et la fréquence.

En ce qui concerne la répartition de l'eau, la priorité est assignée dans le WUAM aux écoulements minimums requis aux noeuds situés à la limite de deux territoires administratifs. Lorsque ces écoulements minimums ne sont pas respectés, des restrictions sont apportées à l'utilisation de l'eau dans le territoire administratif amont, sauf s'il est possible d'éliminer le déficit en prélevant de l'eau dans les réservoirs de ce territoire. Dans ce cas, les restrictions concernant l'utilisation de l'eau, si elles sont nécessaires, sont appliquées d'une façon prédéterminée à toutes les formes d'utilisation, et l'on suppose qu'elles sont également réparties entre tous les noeuds amont.

A.4 MODÉLISATION DE L'UTILISATION DE L'EAU

En général, les prévisions relatives à l'utilisation de l'eau se basent sur des «niveaux d'activité» (p. ex., en ce qui concerne la croissance démographique ou la production économique), sur une tarification de l'eau, sur l'état de la technologie, sur les habitudes en matière d'utilisation de l'eau ainsi que sur les conditions naturelles et climatiques (p. ex., précipitations et évapotranspiration). Sauf pour le secteur de l'irrigation, on prévoit l'utilisation de l'eau d'après des coefficients d'utilisation établis par unité de niveau d'activité et d'activité future (p. ex., prévisions concernant l'importance de la population). Une série de facteurs de modification permet à l'usager du modèle d'accroître les prévisions qui se fondent sur des coefficients afin de tenir compte des progrès technologiques, des tendances en matière d'utilisation de l'eau et des hypothèses posées au sujet des politiques de tarification de l'eau.

A.4.1 Utilisations urbaines et rurales de l'eau

Les utilisations urbaines et rurales de l'eau sont prévues en fonction des niveaux de population et des coefficients de prise d'eau qui sont exprimés en litres par habitant et par jour. La consommation est quant à elle exprimée en pourcentage de la prise d'eau. À l'intérieur de chacune de ces deux catégories, il est possible de subdiviser davantage l'utilisation de l'eau (p. ex., par les secteurs résidentiel et commercial, par les institutions, etc.). Le modèle peut utiliser par défaut les coefficients provinciaux moyens qui figurent dans sa base de données principale si l'on ne dispose pas de données spécifiques sur les bassins secondaires. La partie de l'utilisation urbaine de l'eau qui est attribuable à l'industrie peut également être incluse à ce stade mais elle peut aussi être simulée par l'intermédiaire de l'élément du WUAM qui tient compte de l'utilisation industrielle de l'eau.

A.4.2 Utilisations industrielles de l'eau

Les utilisations industrielles de l'eau sont réparties entre 30 secteurs industriels fondamentaux². Ces secteurs fondamentaux peuvent eux-mêmes être subdivisés en sous-secteurs industriels. On suppose que les utilisations industrielles de l'eau sont fonction du niveau d'activité de chaque industrie dans la zone étudiée. Ces utilisations sont mesurées sur la base du rendement économique et des coefficients d'utilisation de l'eau par unité d'activité qui y sont associés. Les niveaux futurs d'activité de chaque secteur industriel peuvent être extrapolés en fonction des facteurs de croissance généraux (régionaux ou provinciaux). Les facteurs de croissance que l'on emploie dans le cadre de cette méthode peuvent toutefois être modifiés pour tenir compte des différences de croissance industrielle entre les bassins secondaires et des modifications qui sont apportées aux utilisations de l'eau, par exemple lorsque le recyclage est accru.

² Les secteurs industriels sont l'agriculture, foresterie, mines métalliques*, combustibles minéraux*, mines non métalliques*, aliments et boissons*, tabac, caoutchouc et plastiques*, cuir, textiles*, bois*, meubles, papier* et imprimerie, métaux primaires* — fer, métaux primaires — autres, produits métalliques*, machinerie, matériel de transport*, produits électriques, minéraux non métalliques*, pétrole et charbon*, produits chimiques*, industries manufacturières diverses, bâtiment, transports, centrales électriques*, autres services publics, commerce et autres. (L'astérisque indique que l'industrie en question a fait l'objet d'une enquête et que l'on a recueilli des données sur l'utilisation qu'elle fait de l'eau.)

Même si le secteur agricole figure dans la liste, tous les calculs relatifs aux utilisations agricoles de l'eau sont effectués séparément dans les sous-modèles des secteurs de l'irrigation et du bétail. L'agriculture a été incorporée à cette liste afin de faire en sorte que toute croissance économique ayant lieu dans l'agriculture soit reflétée dans la croissance des autres secteurs en faisant passer cette croissance par les matrices intrants-extrants.

Le secteur de la production d'électricité est également traité séparément dans le sous-modèle de l'utilisation de l'eau à des fins de production d'électricité. Il a été incorporé à la liste pour la même raison que le secteur agricole.

Le WUAM s'appuie également sur des matrices intrants-extrants nationales et provinciales pour permettre à l'analyste qui veut examiner les répercussions inter-industrielles de la croissance d'intégrer en série dans les économies nationale et provinciale les révisions de croissance industrielle préparées par l'utilisateur. (On trouvera des explications détaillées des techniques intrants-extrants dans Miernyk [1966] et Tate [1986].)

A.4.3 Production d'électricité

Le WUAM contient un sous-modèle distinct qui traite exclusivement des utilisations de l'eau qui sont propres à la production d'électricité. Le sous-modèle d'utilisation de l'eau pour la production d'électricité (EEWUS) se divise en deux modules qui traitent l'un de la question de l'énergie thermique et l'autre de celle de l'énergie hydroélectrique.

Les quantités d'eau qui sont utilisées par les centrales thermiques à vapeur sont calculées pour chaque centrale en fonction de la production mensuelle d'énergie de celle-ci, de sa prise d'eau et de ses coefficients de consommation (exprimés en millions de mètres cubes par gigawatt-heure). Afin de refléter le fait que les centrales thermiques produiront davantage d'énergie durant les années sèches que durant les années pluvieuses (afin de compenser pour la baisse de production des centrales hydroélectriques), il est nécessaire de préciser une fourchette de production mensuelle d'énergie pour diverses conditions hydrologiques (p. ex., conditions pluvieuses, moyennes et sèches). Les coefficients d'utilisation de l'eau des centrales thermiques sont établis sur la base du type de combustible qui y est brûlé, de la méthode de refroidissement employée et du type de condensateur dont elles sont équipées (Acres International Limited, 1987; Kassem, 1992, annexe B).

Le WUAM ne simule pas les demandes en hydroélectricité; il évalue plutôt la production hydroélectrique sur la base des écoulements simulés des noeuds où se trouvent des centrales

hydroélectriques et aussi en fonction des données sur la hauteur de chute brute d'exploitation et sur l'efficacité de chaque centrale. Si la centrale hydroélectrique est située loin d'un noeud simulé, un facteur d'écoulement pourra être appliqué pour compenser la différence d'écoulement entre le noeud et la centrale. Le calcul de la production d'électricité est uniquement fondé sur la capacité maximum de la centrale.

A.4.4 Utilisations agricoles de l'eau

Les utilisations agricoles de l'eau font l'objet d'une estimation distincte pour les sous-catégories de l'irrigation et du bétail. En ce qui concerne l'irrigation, le WUAM comporte un sous-modèle complet d'utilisation de l'eau. Ce dernier évalue les besoins mensuels en eau des cultures et des dérivations employées pour l'irrigation et évalue aussi l'écoulement restitué en tenant compte des types et de la répartition des cultures, des précipitations, de l'évapotranspiration due aux cultures, des propriétés des sols, de la teneur en eau de ceux-ci ainsi que du genre de système d'irrigation et de méthode de gestion qui sont employés. Des séries chronologiques de données sur les précipitations et l'évapotranspiration sont intégrées au calcul des besoins en eau d'irrigation afin de tenir compte des variations temporelles et spatiales et de garantir une certaine cohérence avec les caractéristiques des approvisionnements en eau. Les calculs de base sont exécutés en millimètres d'eau par hectare durant la saison de culture (qui est définie par l'utilisateur) et pour les antécédents historiques qui sont déterminés au moyen des archives sur les précipitations et l'évapotranspiration potentielle. L'annexe C présente une description détaillée du sous-modèle d'irrigation.

Les quantités d'eau employées pour abreuver le bétail sont estimées en litres par tête et par jour pour chaque type de bétail en fonction de l'importance du cheptel et de la prise d'eau qui y est associée. La consommation est exprimée en pourcentage de la prise d'eau.

A.4.5 Aménagements spéciaux

Un secteur supplémentaire d'utilisation de l'eau, les aménagements spéciaux, est ajouté au modèle pour tenir compte des utilisations qui ne sont pas répertoriées dans les catégories principales sur lesquelles se fonde le WUAM. L'utilisateur doit définir ces aménagements spéciaux et créer une base de données pour les différents types d'activité (p. ex., un projet d'exploitation de sables pétrolifères) et les coefficients d'utilisation de l'eau qui y sont associés (p. ex., 0,9 m³ par baril de sables pétrolifères traités). Pour ce type de projet, l'utilisateur peut incorporer à toute prévision de l'utilisation de l'eau les quantités d'eau qui sont prélevées à cette fin et la consommation qui en résulte en spécifiant quelle serait l'importance de la production de l'installation dont la création est envisagée.

A.4.6 Utilisations de l'eau *in situ*

Dans de nombreux cours d'eau, il est nécessaire de maintenir un écoulement minimum afin de permettre des utilisations *in situ* (p. ex., loisirs, dilution des déchets, pêche, etc.). Le WUAM offre la possibilité de préciser quel doit être, sur une base mensuelle, cet écoulement minimum à la sortie de tout bassin secondaire. Les mois durant lesquels les critères d'écoulement minimum ne sont pas respectés sont signalés dans les résultats, et la gravité ainsi que la fréquence de tels écarts sont analysées.

A.5 APPORTS D'EAU

Les apports d'eau de surface sont simulés sur la base des données concernant l'écoulement naturel aux noeuds. Il faut s'appuyer sur des relevés hydrologiques couvrant une période relativement longue pour pouvoir tenir compte des variations des apports. Les écoulements mesurés doivent être ramenés à leurs caractéristiques naturelles en supprimant les effets que l'utilisation de l'eau et la régularisation du cours d'eau ont eus dans le passé. Les quantités d'eau provenant de la nappe souterraine sont considérées comme des apports supplémentaires

(voir figure A-4). Le WUAM a donc besoin de données sur la proportion du total de l'eau utilisée qui provient de ressources souterraines.

A.6 RÉGULARISATION DES RÉSERVOIRS

On suppose que les réservoirs sont situés à des noeuds du réseau WUAM. Le sous-modèle de régularisation des réservoirs du WUAM est un modèle unique de simulation qui s'appuie sur les courbes de niveau optimal et sur les contraintes d'exploitation. Pour qu'il s'intègre au modèle WUAM d'ensemble, le modèle du réservoir est fondé sur des intervalles mensuels. La simulation du réservoir est basée sur l'équation de continuité simple suivante :

$$S_i = S_{i-1} + I_i - Q_i - E_i$$

où

- S_i = quantité stockée dans le réservoir à la fin de la période en cours, i
- S_{i-1} = quantité stockée dans le réservoir au début de la période, c'est-à-dire à la fin de la période précédente, $i-1$
- I_i = débit entrant durant la période, i
- Q_i = débit sortant durant la période, i
- E_i = quantité nette évaporée durant la période, i

La figure A-5 donne un exemple de courbe des niveaux optimaux d'un réservoir et des contraintes d'exploitation de celui-ci. La courbe des niveaux optimaux du réservoir décrit les successions de niveau et de débit sortant souhaités pour le réservoir. Cette courbe synthétise les données mensuelles suivantes :

- les niveaux maximums souhaitables du réservoir
- les niveaux minimums souhaitables du réservoir
- l'objectif de débit sortant
- le débit sortant du réservoir à ne pas dépasser pour ne pas provoquer de dégâts

Les caractéristiques d'exploitation qui découlent de la courbe des niveaux optimaux sont

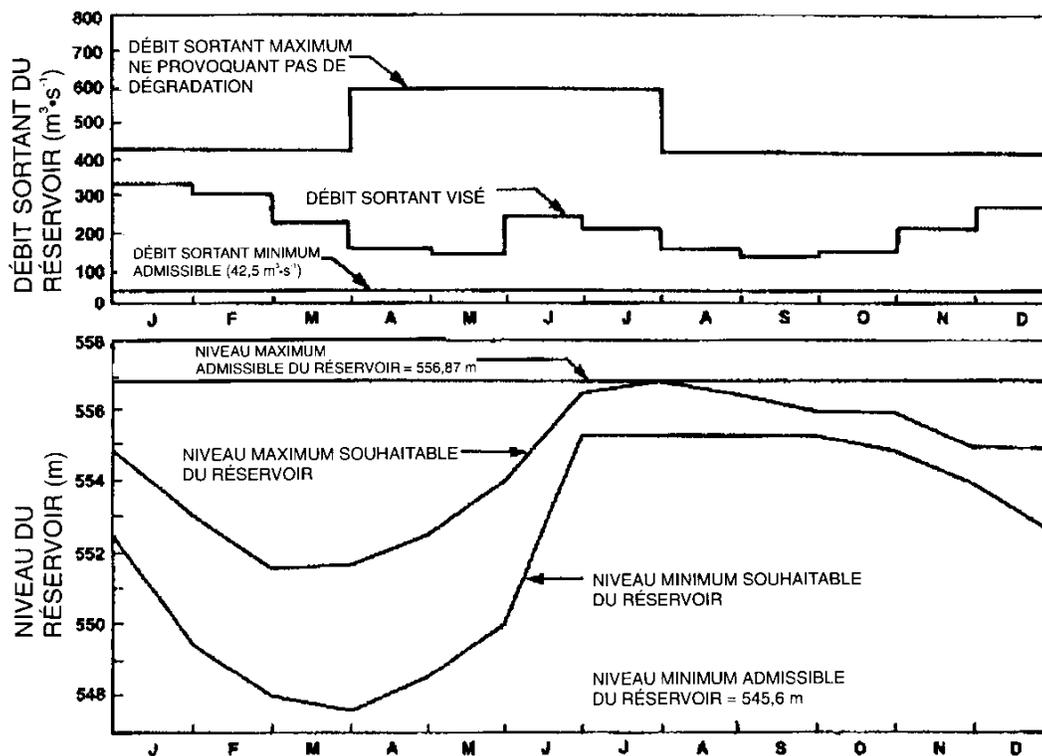


Figure A-5. Courbe des niveaux optimaux et contraintes d'exploitation du réservoir.

assujetties aux contraintes suivantes, qui sont imposées par les caractéristiques physiques du réservoir et d'autres règles d'exploitation :

- le niveau maximum admissible du réservoir (c.-à-d. le niveau qu'atteint le réservoir quand il est plein)
- le niveau minimum admissible du réservoir
- le débit sortant minimum mensuel permettant de satisfaire aux besoins des riverains
- la capacité de débit maximum pour un niveau donné

Tous les objectifs et toutes les contraintes sont pris en considération dans un système de hiérarchie décisionnelle. Fondamentalement, on s'efforce de maintenir le niveau du réservoir entre les niveaux mensuels maximum et minimum

souhaitables. Lorsque cette condition est remplie, on maintient le débit visé. Le système de hiérarchie décisionnelle du WUAM est décrit ci-après, en commençant par les principales priorités.

- En aucun cas on ne laissera le réservoir dépasser le niveau le plus haut qui est admis. Tout excès d'eau sera évacué afin de ramener le réservoir au niveau auquel il est considéré comme plein.
- Le débit minimum nécessaire à la satisfaction des besoins des riverains sera toujours fourni. Si le réservoir est vidé jusqu'au point où il atteint le niveau minimum admissible, seule l'eau en excès par rapport à ce niveau sera évacuée.

- Si le réservoir descend en dessous du niveau minimum souhaitable, le débit sortant sera restreint afin que le niveau du réservoir s'élève.
- Si le niveau du réservoir dépasse le niveau maximum souhaitable sans pour autant que le réservoir atteigne sa pleine capacité, on augmentera le débit sortant au maximum de ce qu'il est possible de relâcher sans occasionner de dégâts afin de ramener le niveau du réservoir jusqu'au maximum souhaitable.
- Si le niveau du réservoir se situe entre le maximum et le minimum souhaitables, on estimera que tous les niveaux sont également appropriés et l'on amènera le débit sortant à la quantité visée.

Une série complète de données décrivant les caractéristiques physiques et d'exploitation du réservoir doit être fournie pour chacun d'eux. Le modèle WUAM d'ensemble procède à la simulation noeud par noeud en commençant par les noeuds amont et en passant progressivement par tous les noeuds qui se succèdent ensuite d'amont en aval. En présence d'un réservoir, le débit sortant du noeud est calculé sur la base des règles d'exploitation spécifiées pour ce réservoir.

Deux formules d'interaction ont été incorporées au modèle afin que les réservoirs puissent faire face à deux types de déficit hydrologique :

- Si la consommation locale est en déficit à un noeud, le modèle cherche à éliminer ce déficit grâce à un réservoir situé en amont sur le même territoire administratif. Ce réservoir peut être ramené jusqu'au niveau minimum souhaitable. Si le déficit ne peut être éliminé de cette façon, le modèle cherche à trouver un autre réservoir amont et répète le processus.
- Si le débit minimum prévu en vertu d'un accord de répartition des écoulements entre

des administrations n'est pas respecté à un noeud frontalier, le modèle cherche à supprimer le déficit grâce à des réservoirs situés en amont, exactement de la façon décrite ci-dessus.

A.7 AUTRES CARACTÉRISTIQUES

A.7.1 Tarification de l'eau

Le WUAM permet d'étudier la manière dont tout changement du prix de l'eau se répercute sur la demande dans les secteurs urbain et industriel. Fondamentalement, l'utilisateur définit une courbe de demande en eau par une compilation de points. La courbe de demande exprime la relation entre la quantité d'eau utilisée (litres par habitant et par jour pour l'alimentation des zones urbaines et millions de mètres cubes [Mm³] par dollar de production en ce qui concerne les industries) et le tarif correspondant. La courbe de demande est utilisée en conjonction avec des hypothèses formulées au sujet des tarifs ultérieurs pour produire des prévisions de demande en eau ajustées en fonction du tarif, ainsi que le montre la figure A-6.

Le WUAM propose également deux autres algorithmes de tarification qui sont basés sur une analyse de régression de l'utilisation de l'eau par l'industrie/des données relatives aux coûts recueillies par Environnement Canada (Renzetti, 1986, 1987). Dans le cadre du modèle, ces algorithmes sont connus sous les noms de méthode du coefficient tarifaire et méthode de l'élasticité par rapport aux prix. Ces méthodes ont été décrites par Acres International Limited (1986) et par Kassem (1992, annexe C).

A.7.2 Dérivations d'eau et stockage hors du cours d'eau

Les dérivations d'eau peuvent être soit internes, c'est-à-dire comprises entre deux noeuds du réseau, soit externes, le bassin versant étudié pouvant alors gagner ou perdre de l'eau par des apports en provenance de bassins adjacents ou des déversements vers ceux-ci. Les écoulements de dérivation sont spécifiés sur une base

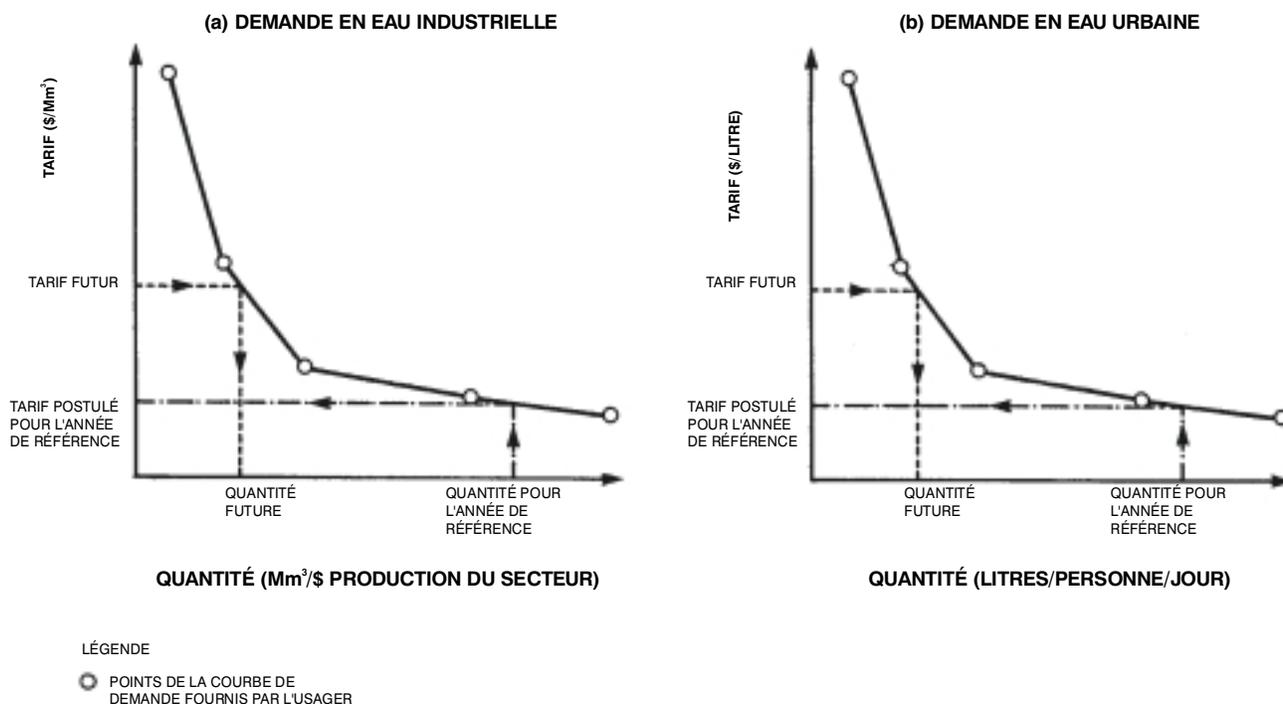


Figure A-6. Courbes de la demande en eau.

mensuelle afin d'intégrer les variations saisonnières. Il est possible de tenir compte du stockage en dehors du cours d'eau dans le cas des zones d'irrigation, des aménagements spéciaux et des centrales thermiques en précisant comment se répartissent les prélèvements d'eau correspondants.

A.7.3 Écoulements divisés

Lorsque des bassins hydrographiques chevauchent le territoire de deux administrations, il est possible d'intégrer à l'intérieur d'une simulation WUAM les écoulements minimums que l'administration amont doit garantir à l'administration aval en indiquant au modèle qu'il doit ouvrir des fichiers sur l'écoulement frontalier.

A.7.4 Rationnement de l'eau et restrictions à la consommation

Deux types de pénurie d'eau peuvent être mis en évidence dans une simulation WUAM : une pénurie à la consommation, lorsque la demande de consommation est supérieure à l'offre à un noeud, et une pénurie frontalière, lorsque l'on

constate que le surplus d'eau à la frontière de deux territoires administratifs est inférieur à la quantité que l'administration amont doit fournir à l'administration aval. Le premier type ne touche qu'un seul noeud alors que le deuxième a des répercussions sur l'ensemble des noeuds de la branche située en amont du noeud frontalier où il y a pénurie. Dans les deux cas, le modèle s'efforcera tout d'abord d'éliminer le déficit en ramenant le niveau d'un ou de plusieurs réservoirs amont au niveau minimum souhaitable indiqué par la courbe des niveaux optimaux (tel qu'expliqué précédemment). Si cela n'est pas possible, un rationnement et des restrictions à la consommation seront imposés. On suppose que ces restrictions touchent l'ensemble des utilisateurs de l'eau en fonction d'une série de priorités prédéterminées. Cet ordre de priorité est établi par l'utilisateur entre les municipalités, l'irrigation, l'abreuvement du bétail et l'industrie.

Un classement est attribué à chaque catégorie (de 1 à 4, le rationnement commençant par ce qui est classé en 1). En plus de fournir un ordre de priorité pour les diverses formes de

consommation, l'utilisateur du modèle indique également un certain nombre d'unités d'augmentation des restrictions pour chaque catégorie. L'approvisionnement en eau ne sera interrompu que pour la première unité d'accroissement de l'utilisation la moins importante avant qu'une restriction ne s'applique à la première unité de la catégorie suivante. Si la pénurie n'a pas été résorbée après que l'on ait restreint l'approvisionnement destiné à la première unité de toutes les catégories, les restrictions sont appliquées à la deuxième unité, et ainsi de suite.

A.8 RÉSULTATS

Les résultats du WUAM sont présentés sous forme de tableaux et de graphiques sur une base mensuelle, par saison d'irrigation et sur une base annuelle. Ils comprennent les éléments suivants :

- des résumés de l'utilisation de l'eau (prélèvements et consommation) pour l'année de prévision par catégorie d'utilisations (des valeurs moyennes sont données pour l'irrigation) pour chacun des bassins secondaires de la zone d'étude
- des résultats détaillés en ce qui concerne le bilan hydrologique aux noeuds du réseau
- un résumé statistique des pénuries d'eau et des restrictions à la consommation pour chaque noeud, ce résumé étant complété par des statistiques sur les prélèvements d'eau et la consommation dans des conditions d'apport minimum, moyen et maximum

- des imprimés supplémentaires comprenant :
 - pour chacune des zones d'irrigation ayant fait l'objet d'une simulation, des fichiers-résultats faisant état du bilan hydrique, des quantités dérivées mensuellement à des fins d'irrigation, des écoulements restitués, etc.
 - des résultats décrivant l'exploitation de tous les réservoirs touchés par la simulation, ces résultats récapitulant l'évolution du niveau du réservoir et des quantités d'eau relâchées, etc.
 - une récapitulation des besoins en eau de chacune des centrales thermiques incluses dans la simulation
 - un résumé des quantités d'électricité produites mensuellement pour chacune des centrales hydroélectriques ayant fait l'objet d'une simulation.

A.9 RÉFÉRENCES

- Acres International Limited. 1986. Water supply constraints to energy development. Phase V. Summary report. Rapport préparé pour la Direction générale des eaux intérieures, Environnement Canada, Ottawa. Rapport non publié.
- Acres International Limited. 1987. Water supply constraints to energy development. Phase VI. Summary report. Rapport préparé pour la Direction générale des eaux intérieures, Environnement Canada, Ottawa. Rapport non publié.
- Kassem, A. 1992. The Water Use Analysis Model (WUAM) program documentation and reference manual. Direction de la conservation et de l'économie, Direction générale des sciences et de l'évaluation des écosystèmes, Environnement Canada, Ottawa.
- Miernyk, W.H. 1966. The elements of input-output analysis. New York: Random House.
- Renzetti, S. 1986. Industrial water demand in British Columbia. Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, région du Pacifique et du Yukon. Rapport non publié.
- Renzetti, S. 1987. The economic aspects of water use. Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, Ottawa. Rapport non publié.
- Tate, D.M. 1986. Structural change implications for industrial water use. Water Resour. Res. 10(11): 1526-1530.

Annexe B

**Données sur l'écoulement naturel et l'écoulement à la
frontière de l'Alberta et de la Saskatchewan**

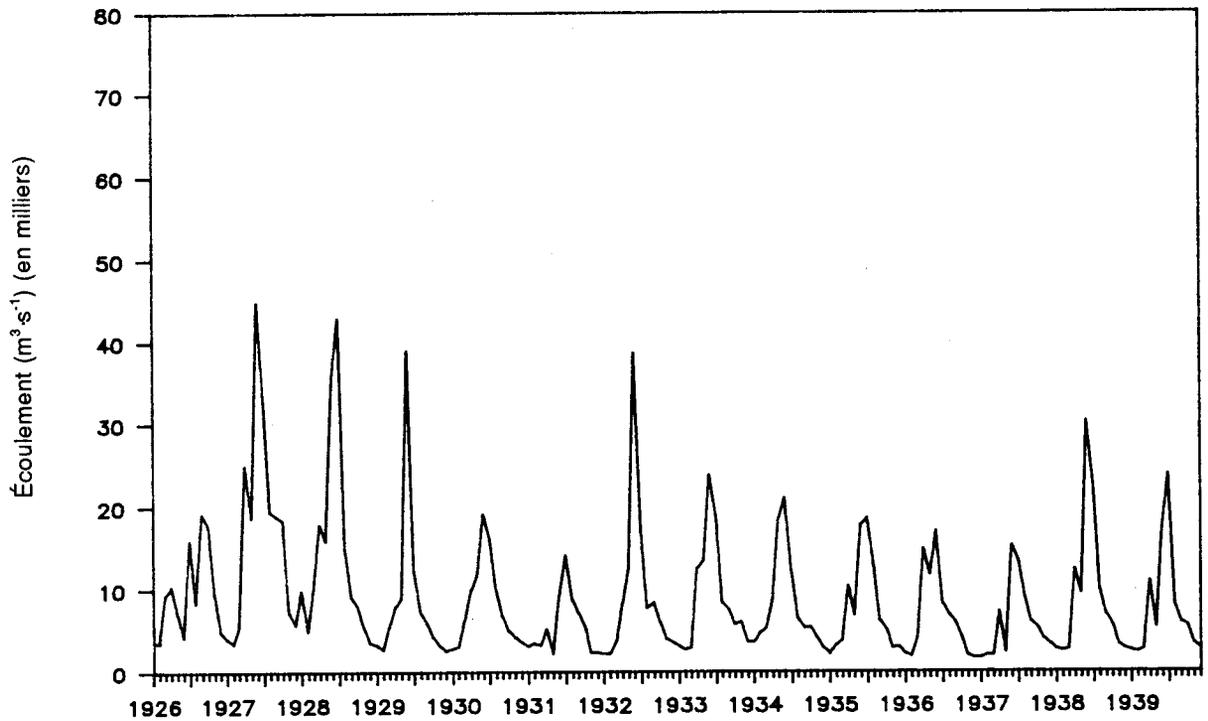
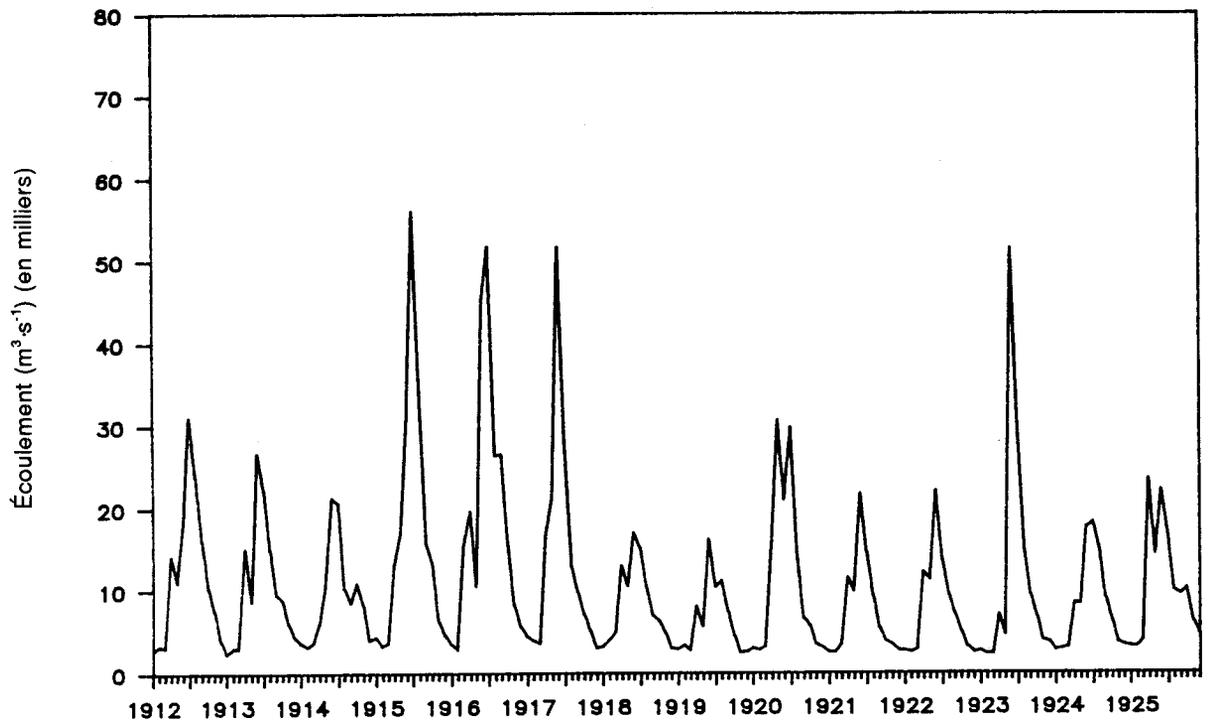


Figure B-1. Écoulements naturels, jauge 05HH001, rivière Saskatchewan Sud à St. Louis.

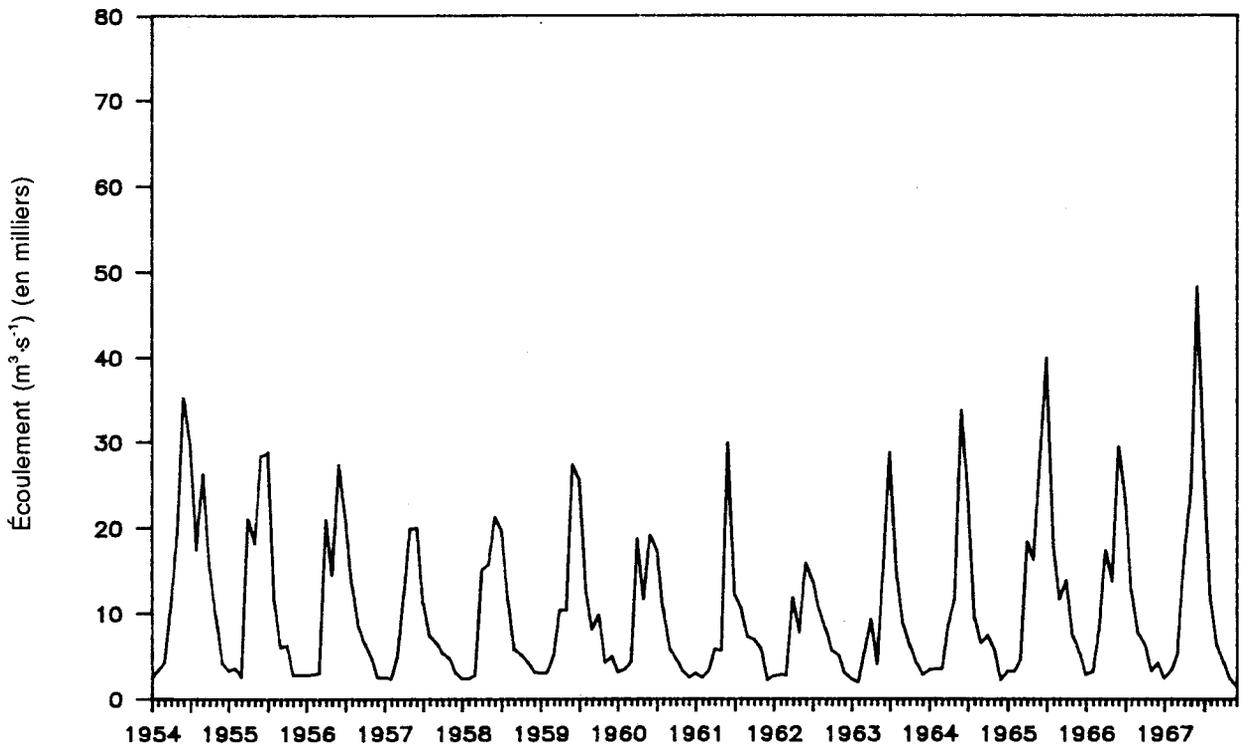
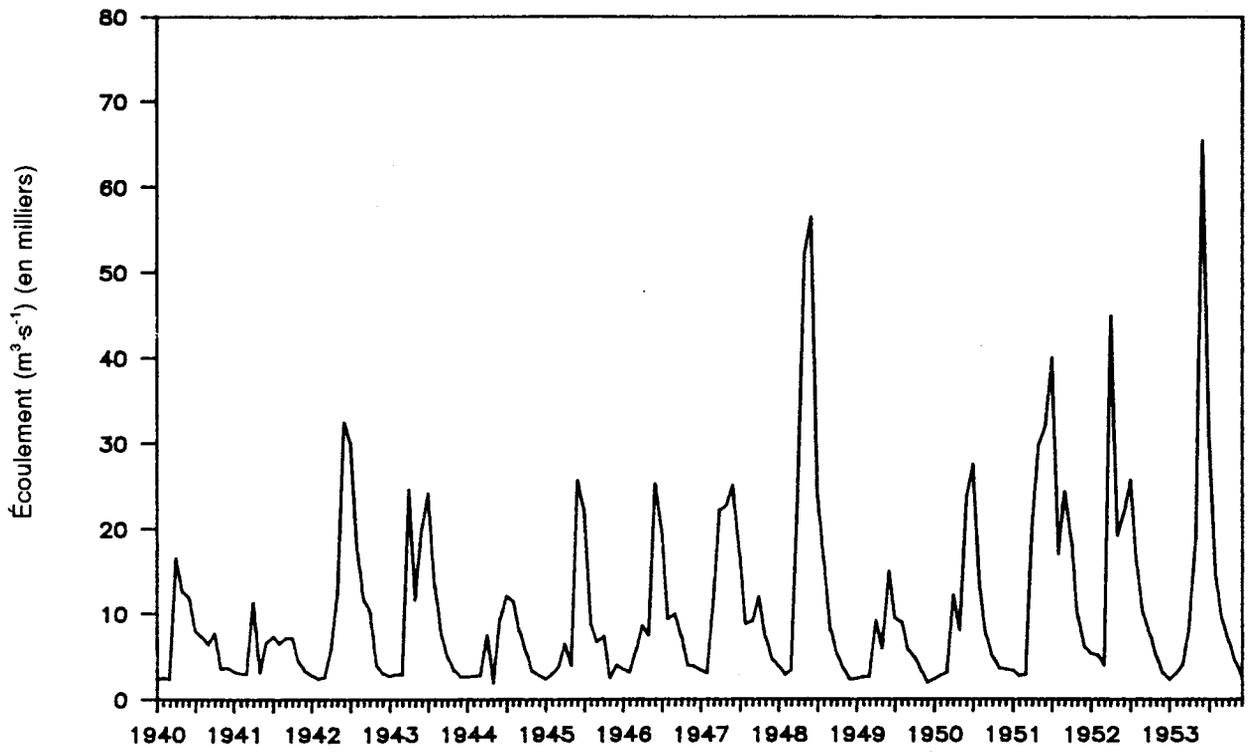


Figure B-1. Suite .

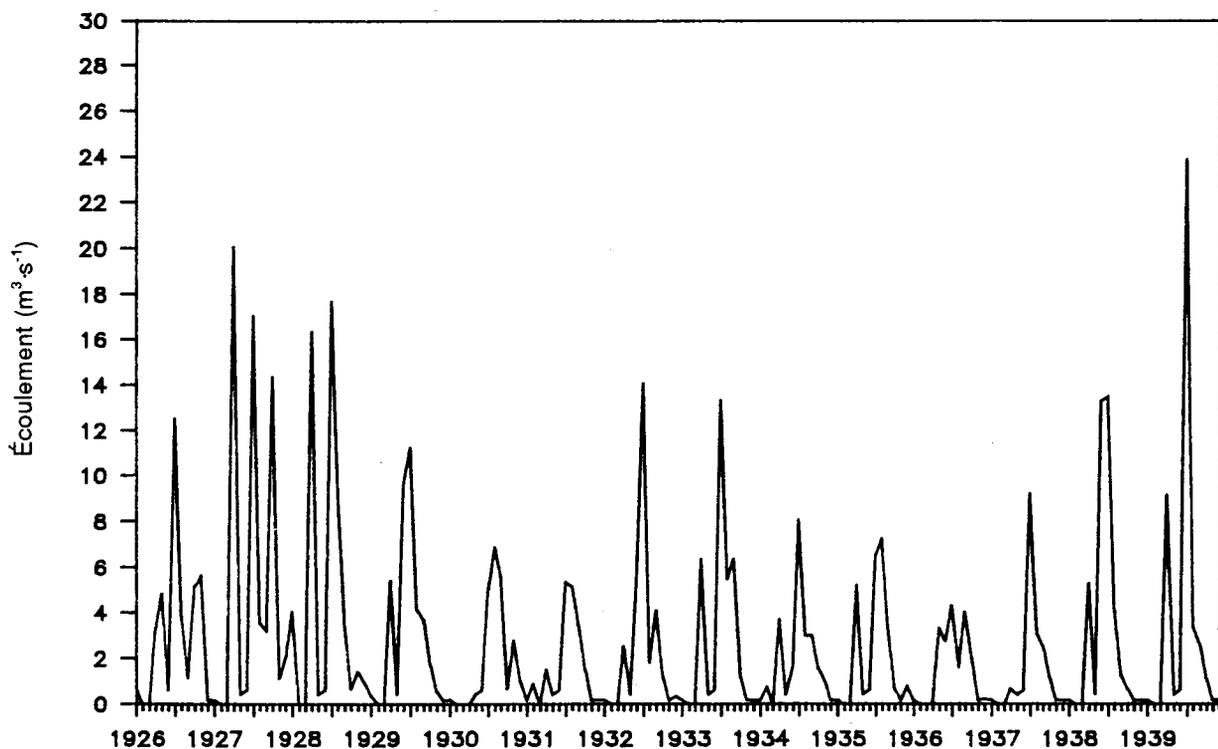
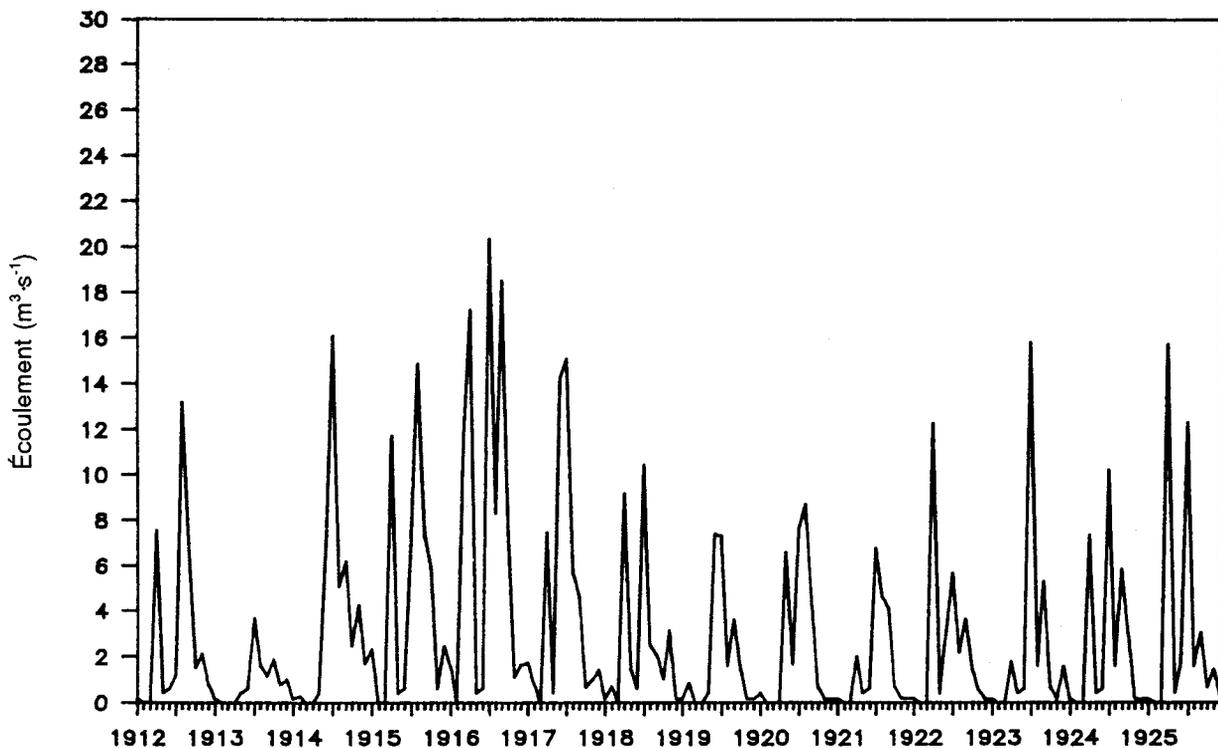


Figure B-2. Écoulements naturels, jauge 05HD039, ruisseau Swift Current à Leinan.

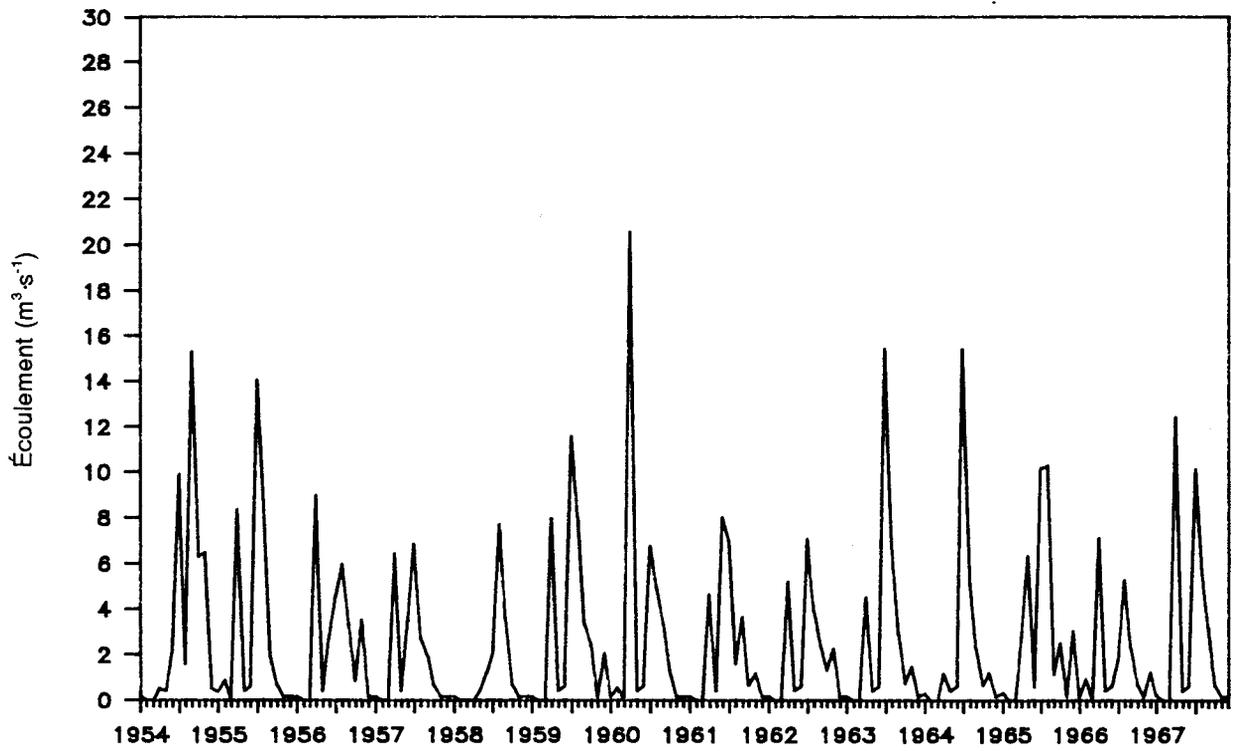
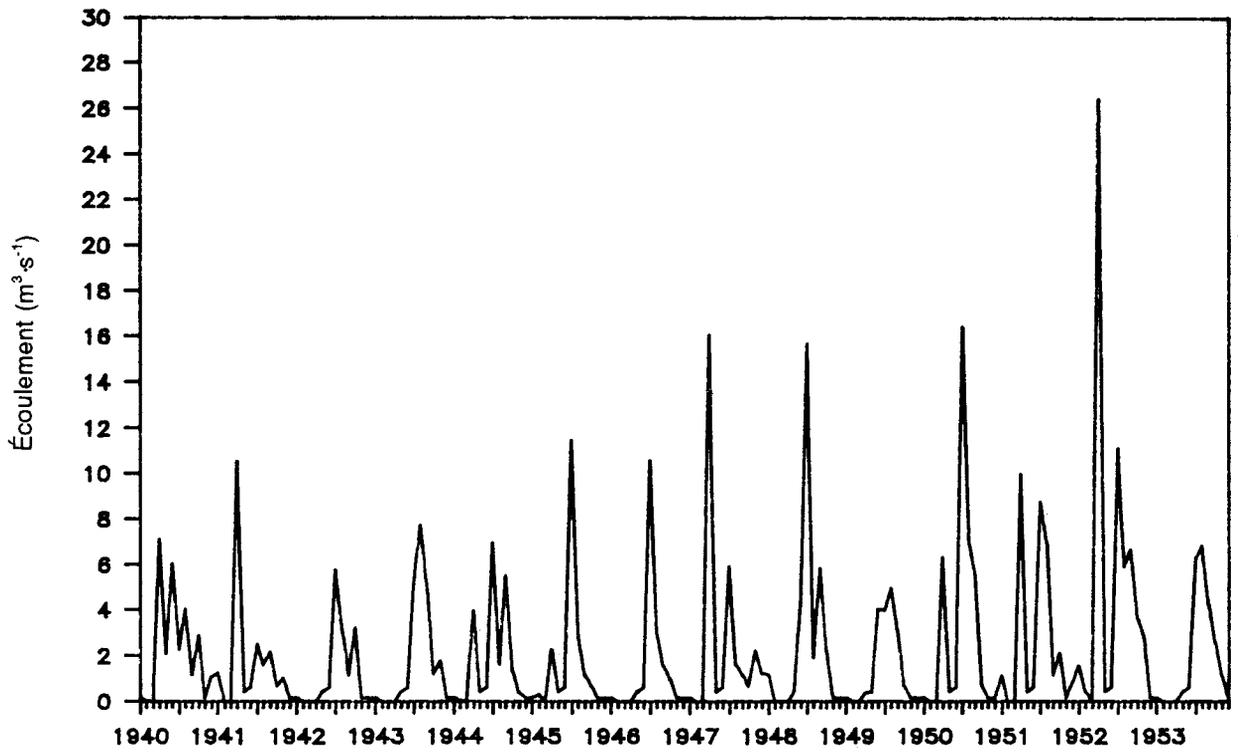


Figure B-2. Suite.

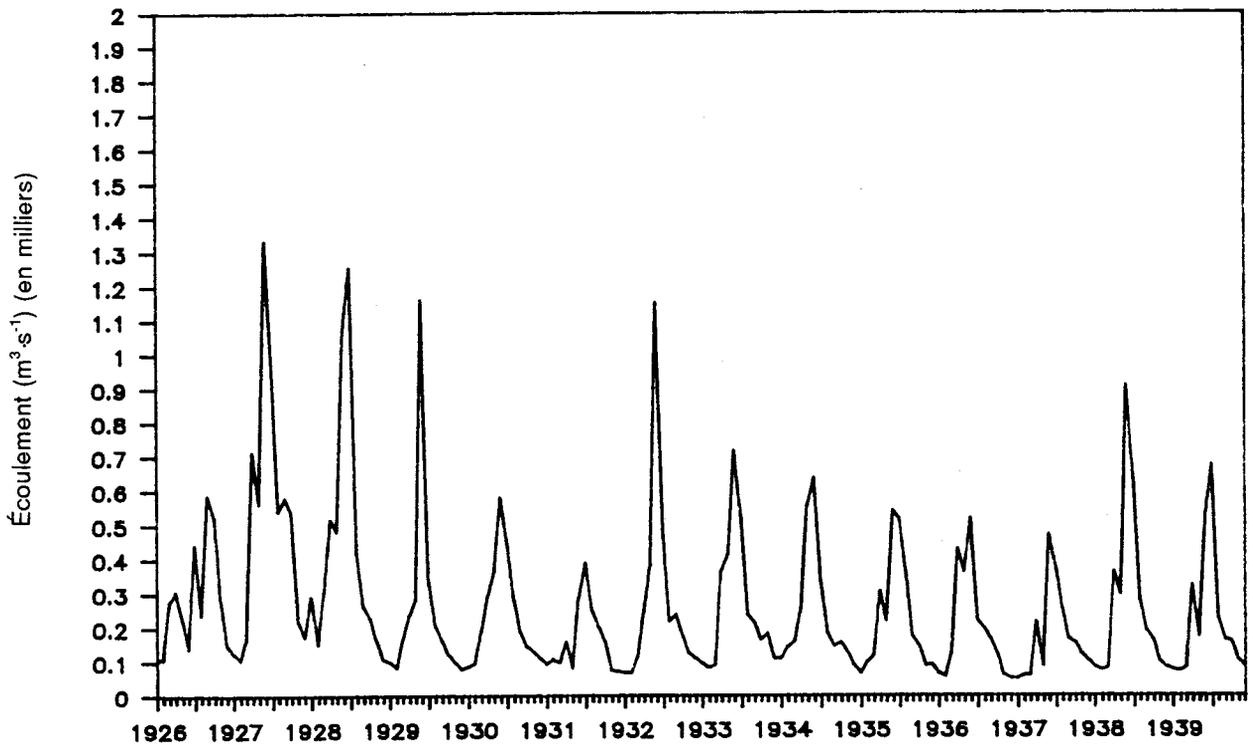
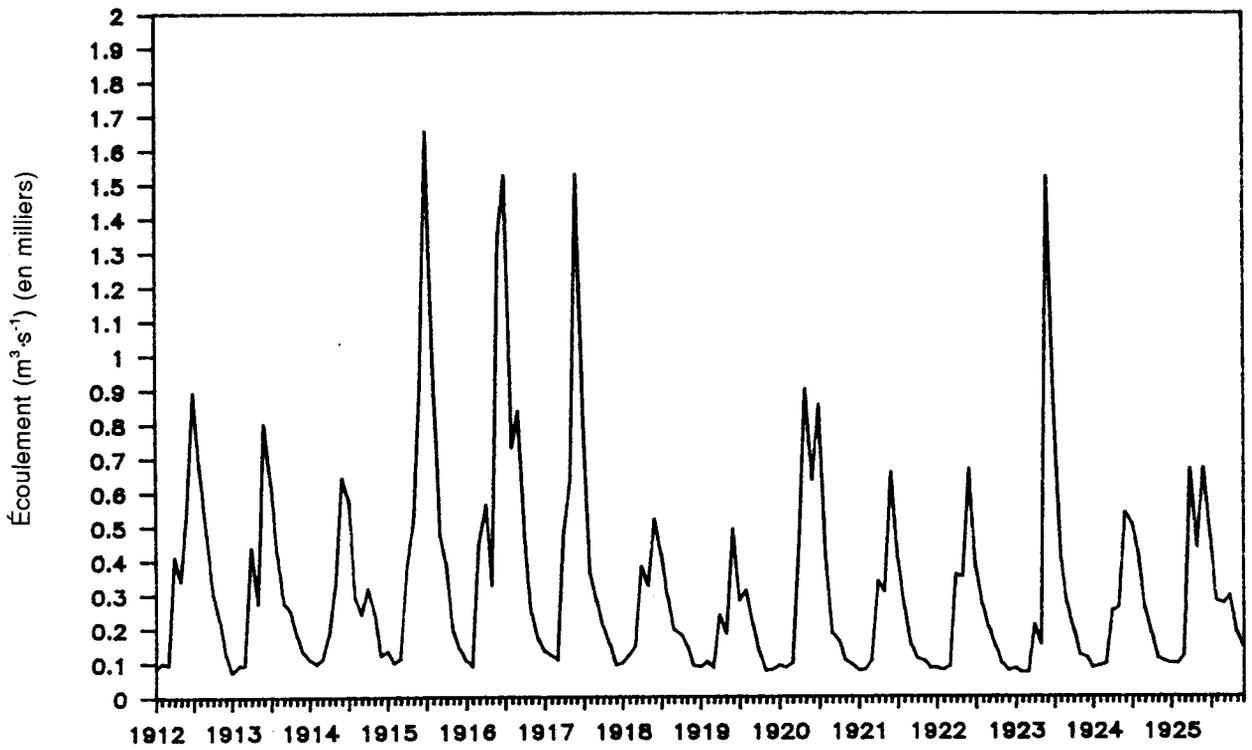


Figure B-3. Écoulements naturels, jauge 05HG001, rivière Saskatchewan Sud à Saskatoon.

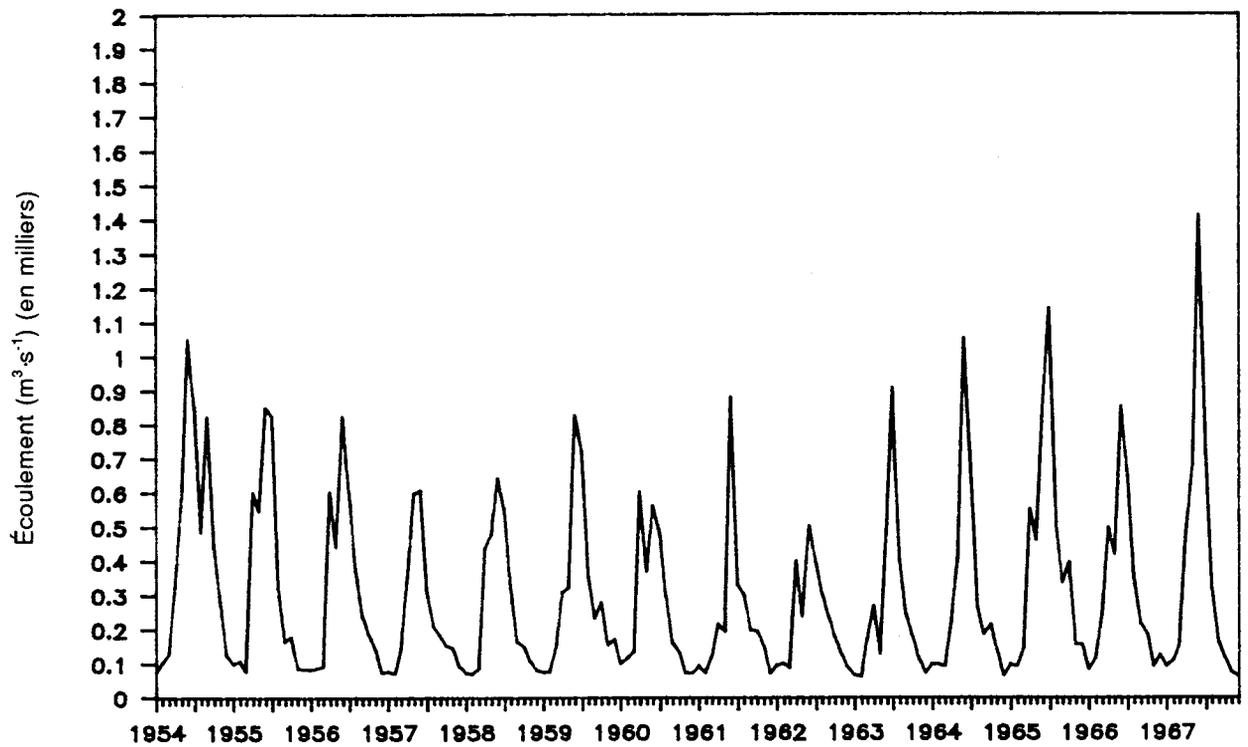
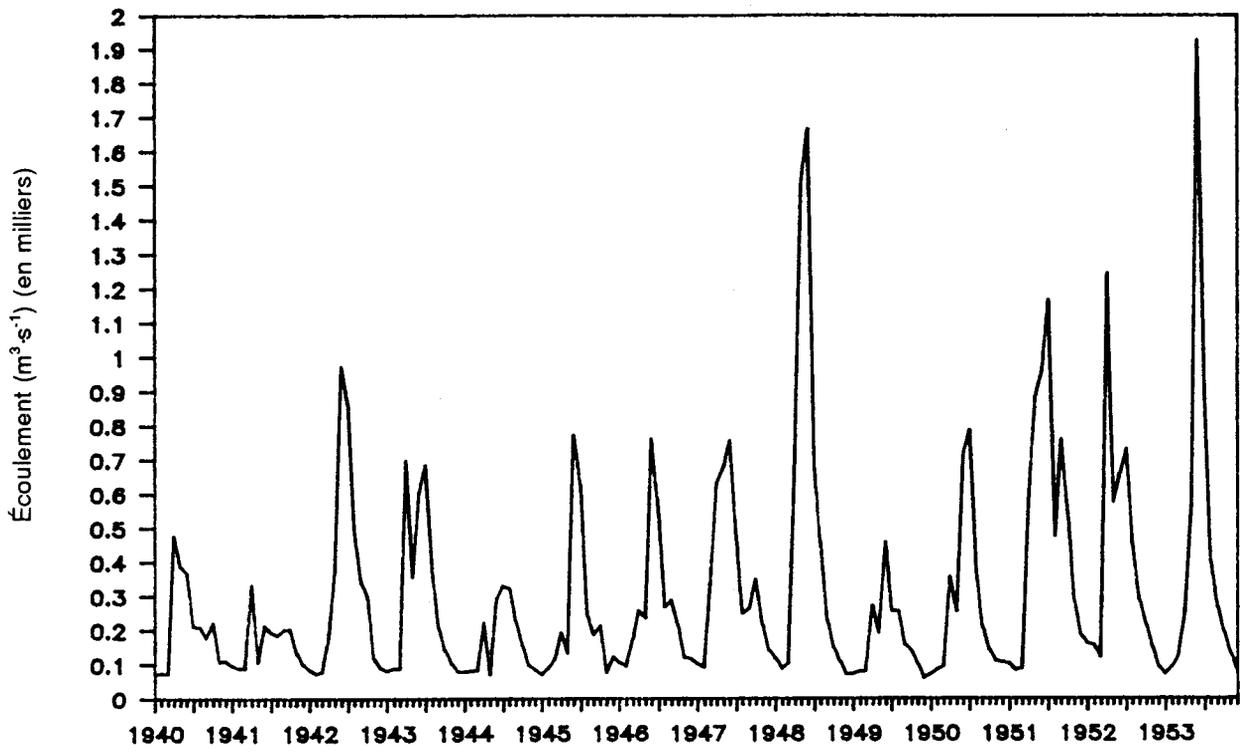


Figure B-3. Suite.

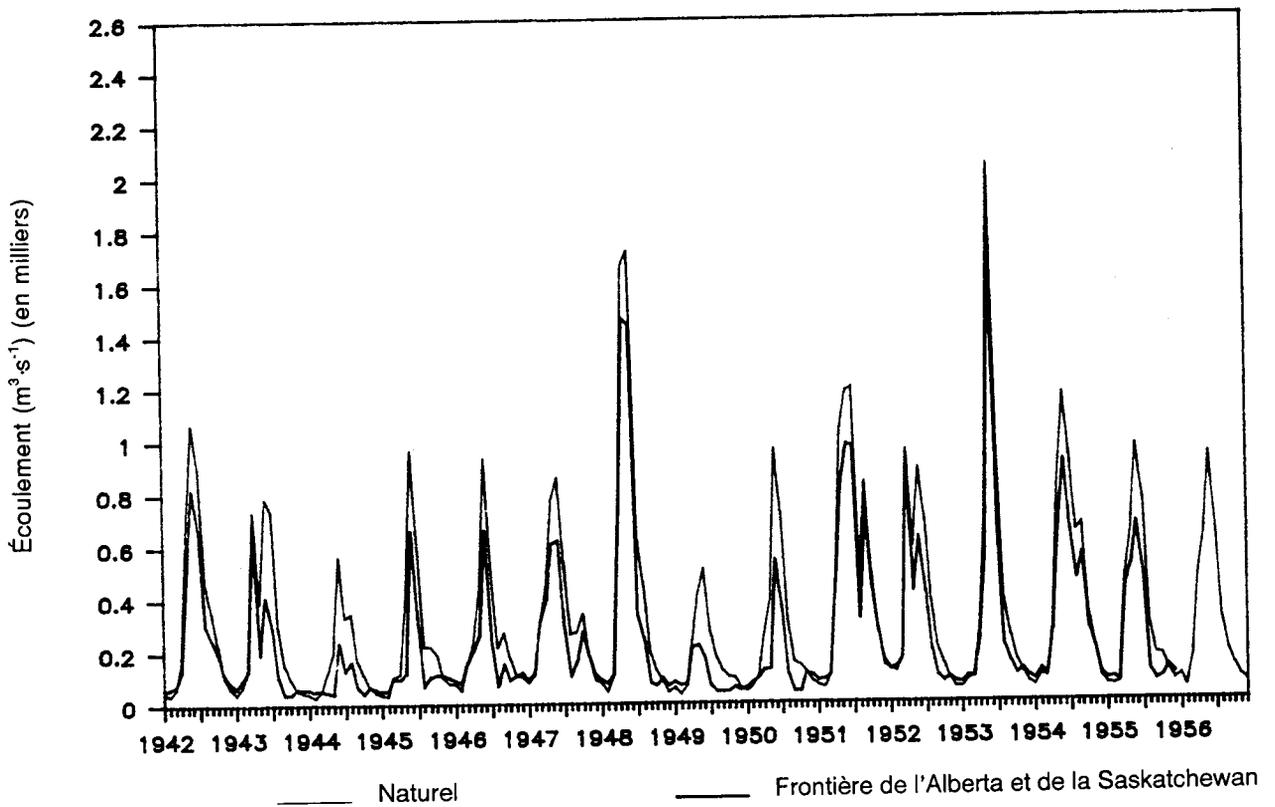
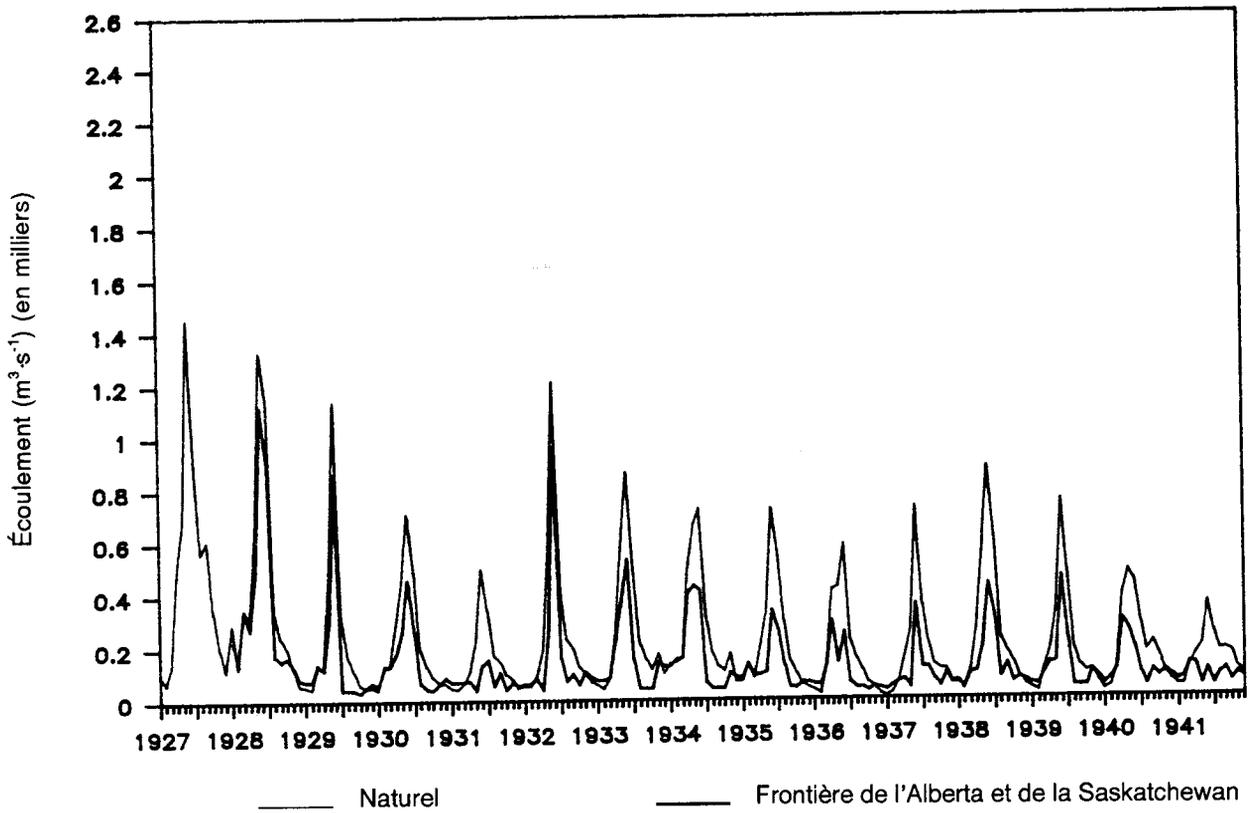


Figure B-4. Écoulements naturels et frontaliers du scénario 1.

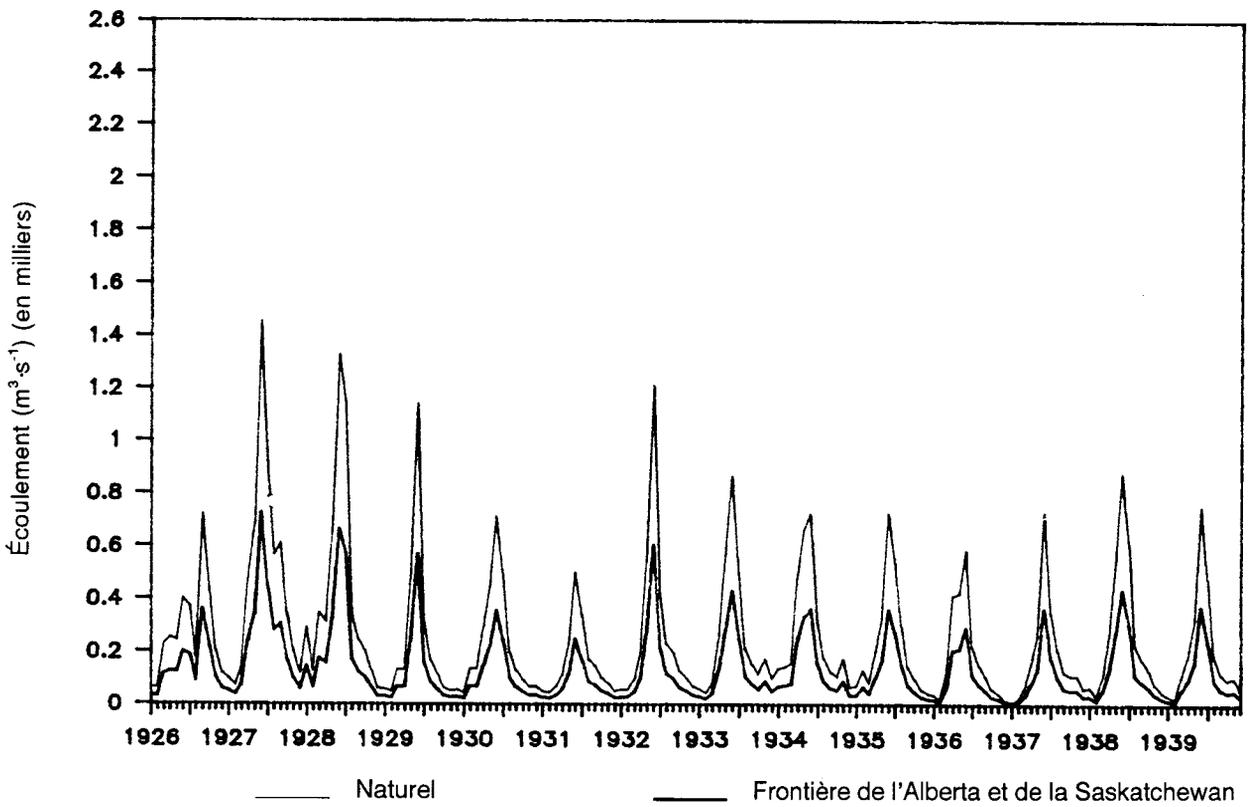
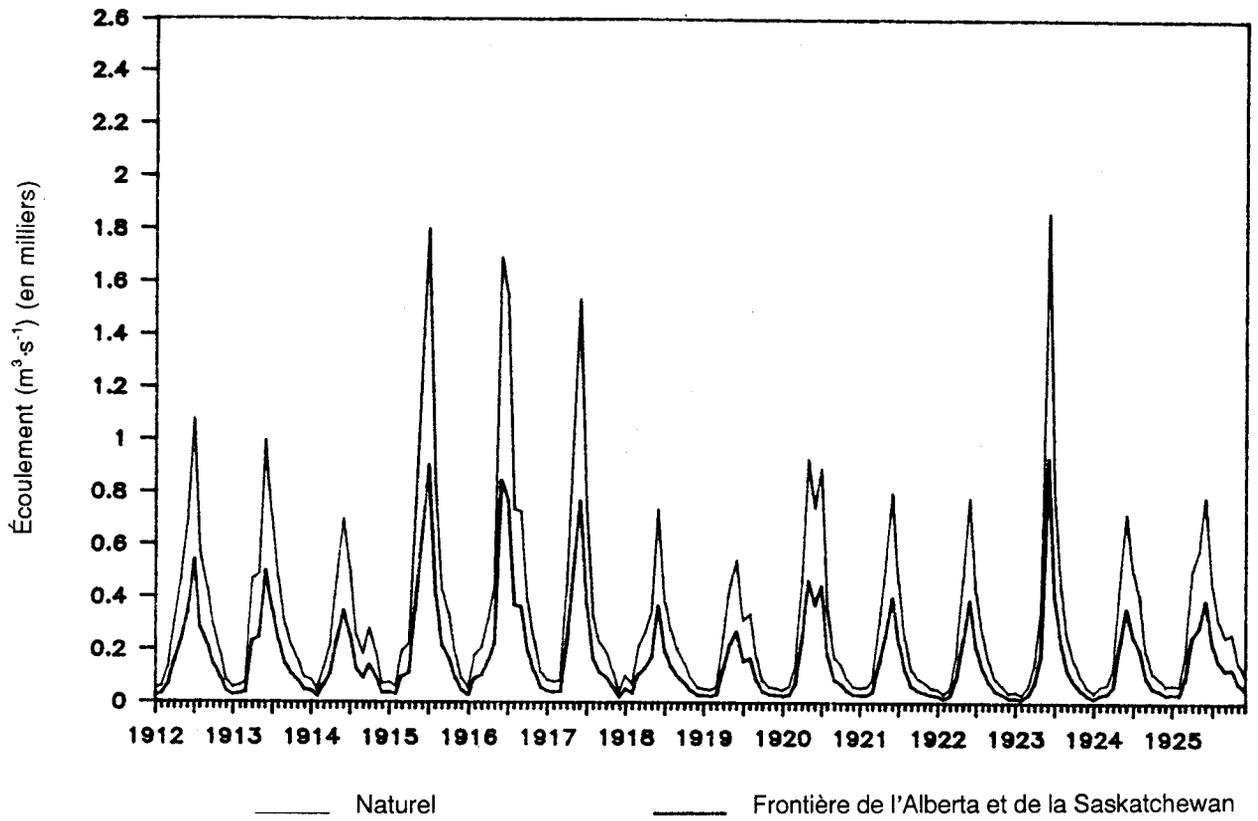


Figure B-5. Écoulements naturels et frontaliers des scénarios 2 et 4.

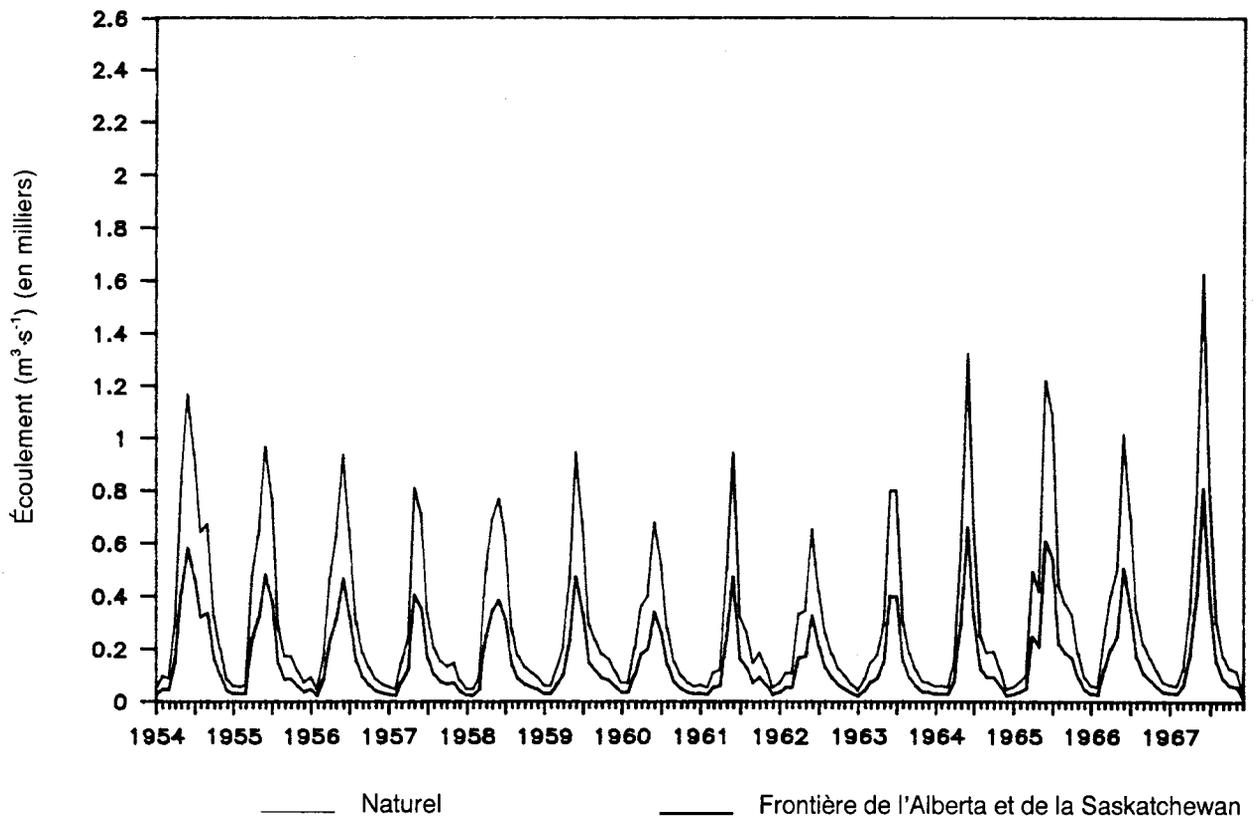
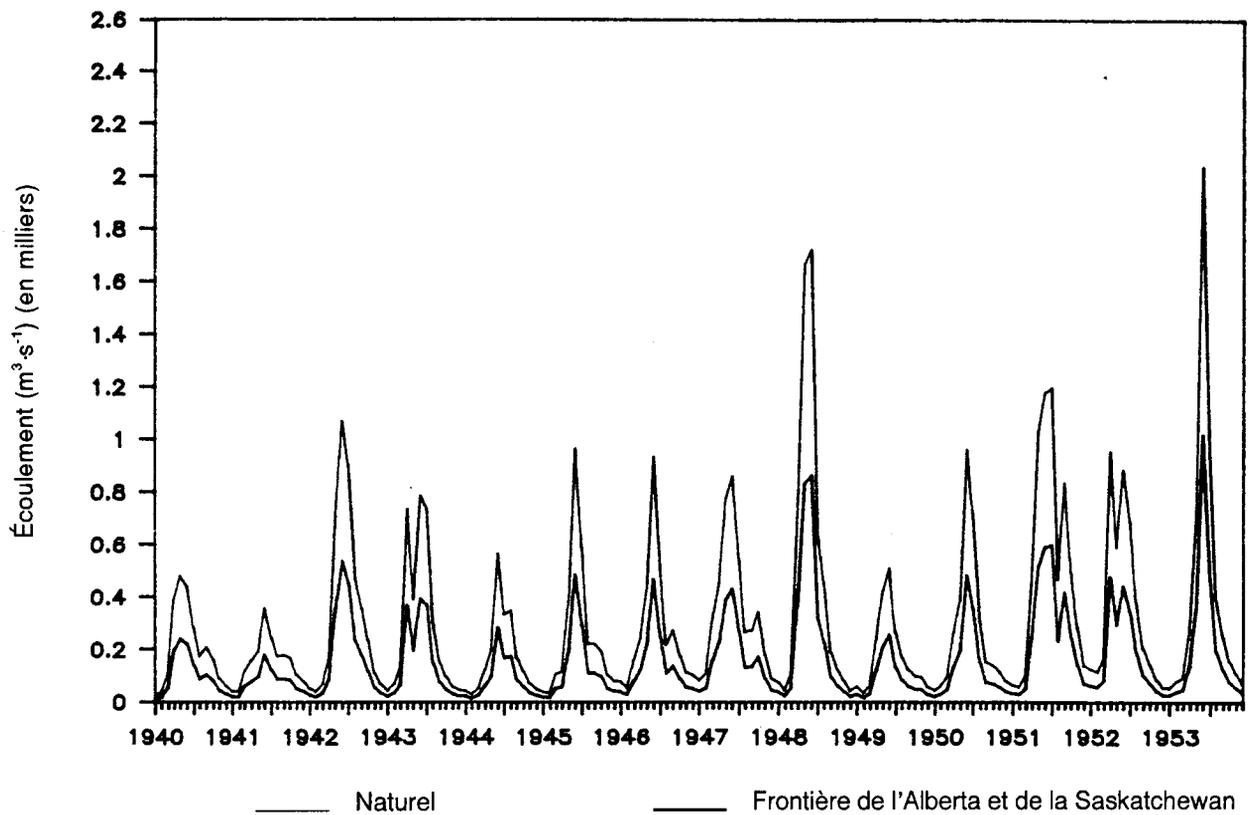


Figure B-5. Suite.

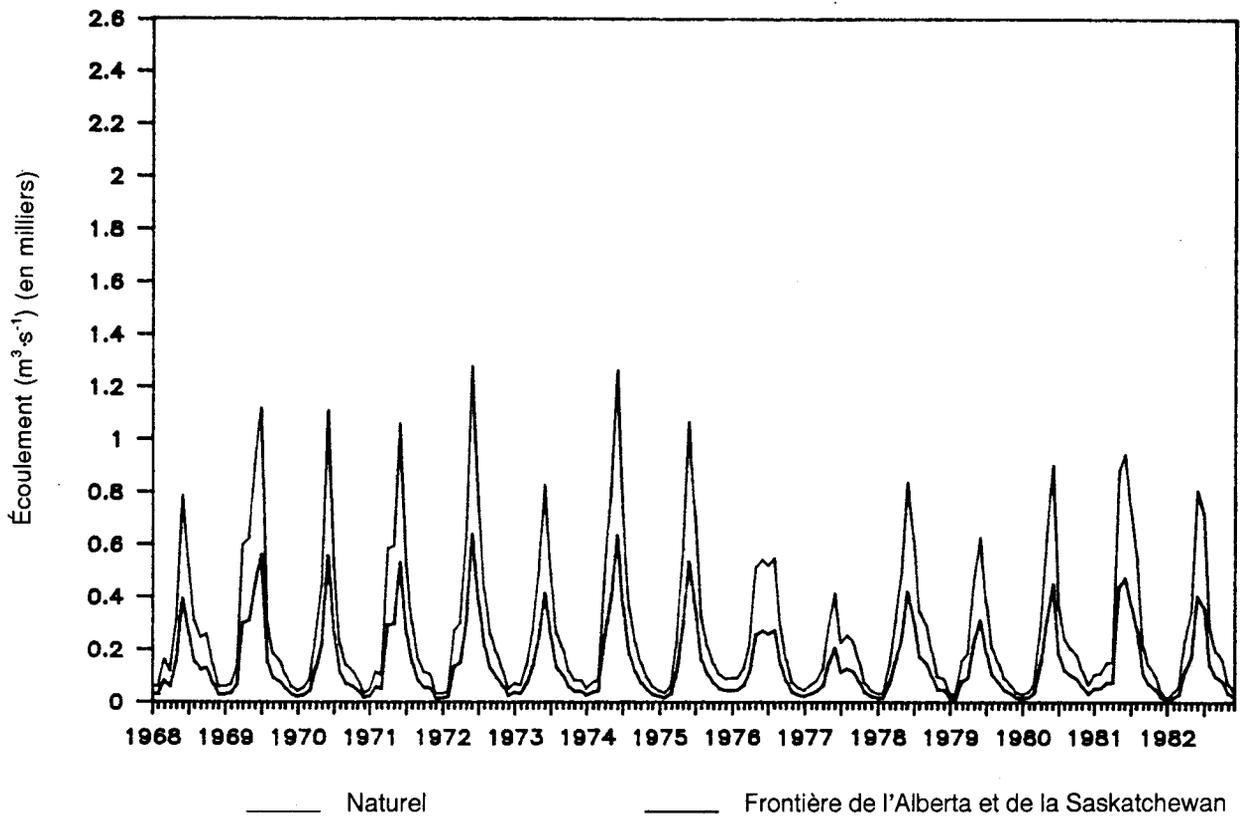


Figure B-5. Suite.

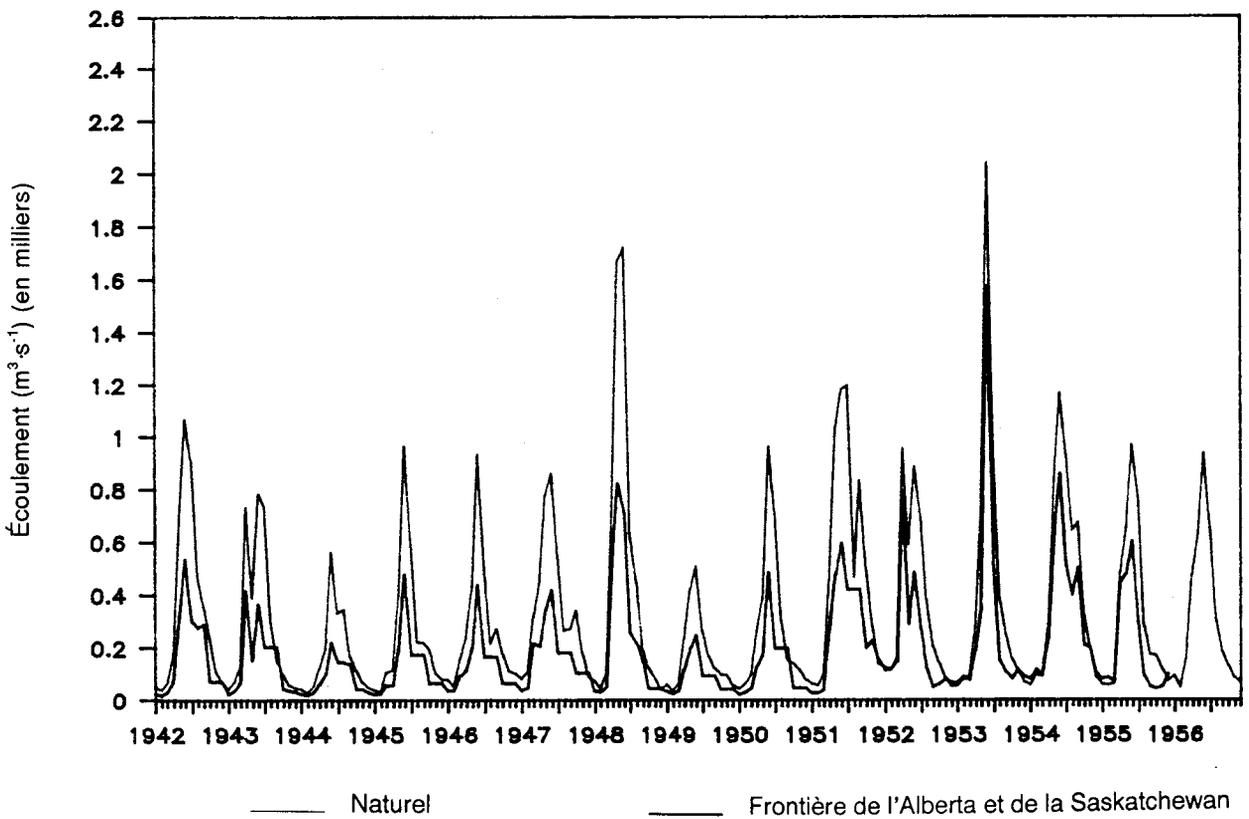
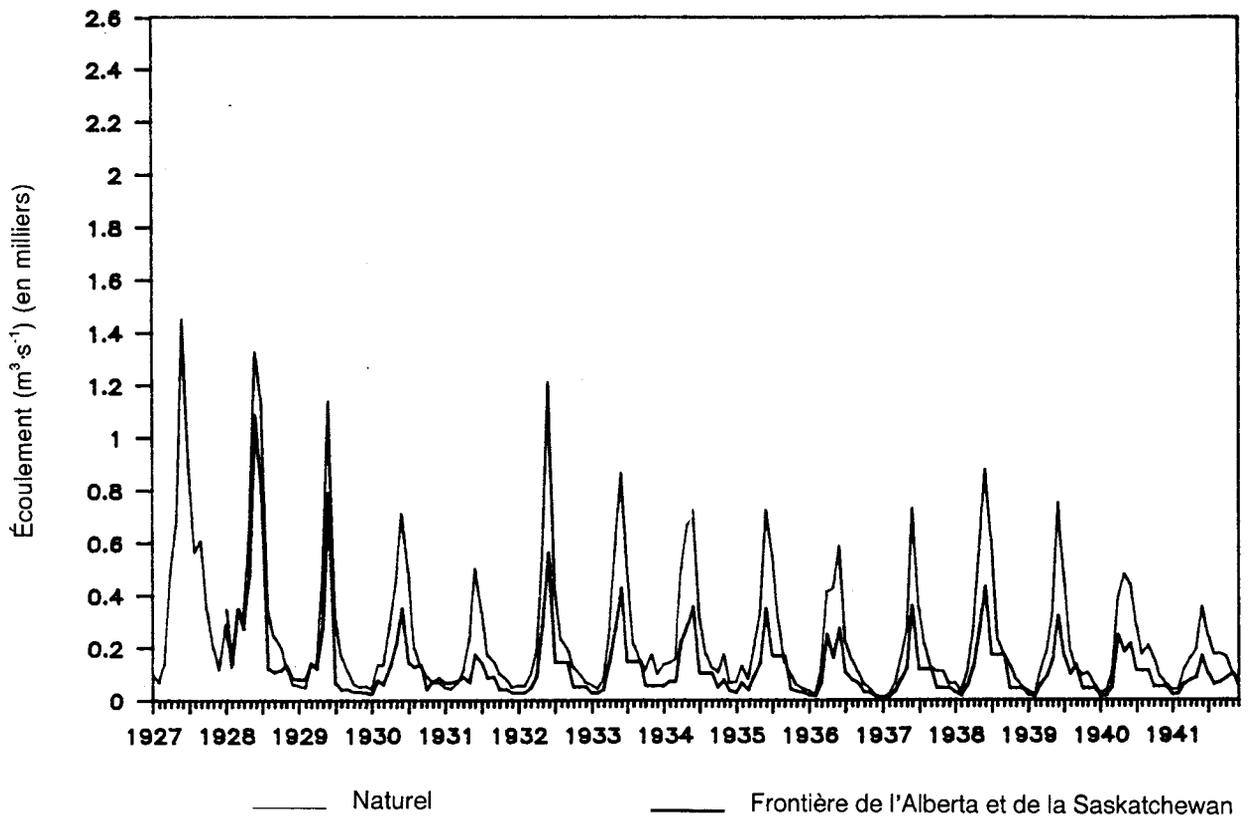


Figure B-6. Écoulements naturels et frontaliers du scénario 3.

Annexe C

Élément d'irrigation du modèle d'analyse d'utilisation de l'eau¹

C.1 INTRODUCTION

Le sous-modèle d'irrigation a principalement pour objet de fournir des estimations réalistes d'une part des quantités d'eau dérivées à des fins d'irrigation et d'autre part de l'écoulement restitué. Ces estimations sont ensuite combinées avec les autres utilisations de l'eau dans le WUAM. À l'inverse de ce qui est le cas pour les autres utilisations de l'eau, l'irrigation peut varier fortement d'une année à l'autre sous l'influence de facteurs climatiques, principalement les précipitations et l'évapotranspiration potentielle des cultures. Les quantités d'eau qui sont utilisées pour l'irrigation varient également en fonction des propriétés spécifiques des cultures et des sols, des systèmes d'irrigation et de leur efficacité ainsi que de facteurs économiques et sociaux.

Le sous-modèle d'irrigation a été élaboré en tenant compte de certains objectifs clairement établis :

- Le désir de parvenir à un degré raisonnable de précision, le sous-modèle devant tenir compte des paramètres fondamentaux qui influent sur les besoins en eau d'irrigation.
- Simultanément, on estimait qu'il était important que le sous-modèle demeure aussi simple que possible pour ne pas perdre de vue l'objectif global du WUAM. Il fallait donc éviter de modéliser de façon complexe les méthodes et les activités au palier de chaque champ ou entreprise agricole.

- On souhaitait conserver un fort degré de compatibilité avec le modèle principal, aussi bien du point de vue de la structure que du traitement des données.
- Il fallait que le modèle soit assez souple pour permettre d'étudier les répercussions de l'évolution future des méthodes d'irrigation sur la demande en eau.
- Le sous-modèle devait être facile à utiliser.

Cette annexe décrit en détail le sous-modèle d'irrigation en examinant ses paramètres principaux, l'approche qui a présidé à sa conception, les données qui lui sont nécessaires ainsi que les méthodes/algorithmes employés. Le sous-modèle a été élaboré par Acres International Limited (1984).

C.2 FACTEURS QUI INFLUENT SUR L'UTILISATION DE L'EAU À DES FINS D'IRRIGATION

L'utilisation de l'eau pour l'irrigation dépend de nombreux facteurs qui peuvent être aussi bien physiques que climatiques, économiques, sociaux ou politiques. Les facteurs physiques qui, s'ils sont modifiés, peuvent influencer sur l'utilisation de l'eau à des fins d'irrigation comprennent la superficie irriguée, la répartition et le type des cultures ainsi que les méthodes d'irrigation, l'intensité avec laquelle celle-ci a lieu et son efficacité. Certaines combinaisons de ces facteurs n'amènent que peu de changements dans l'utilisation globale de l'eau, voire même pas du tout, tout en augmentant substantiellement le rendement des cultures. Les facteurs climatiques sont dominés par les précipitations et l'évapotranspiration potentielle. L'élément coût aura des répercussions sur le degré auquel des

¹ Il s'agit d'une révision d'un document publié dans Kassem (1992, annexe A).

changements physiques sont apportés. Des facteurs sociaux et politiques peuvent quant à eux prendre le pas sur les autres.

Le sous-modèle d'irrigation ne tient compte que des facteurs climatiques et physiques, et ceux-ci sont examinés ci-après.

C.2.1 Précipitations et teneur en eau des sols

Au Canada, l'agriculture est saisonnière et les sols ne sont généralement cultivés que de mai à septembre. Durant ces mois, une bonne partie des précipitations pénètrent directement dans le sol et vont humidifier la rhizosphère. En dehors de la saison de culture, seule une faible proportion des précipitations contribuent au maintien de la teneur en eau du sol.

Du point de vue de la quantité d'eau qui est absorbée par les cultures, l'efficacité des précipitations correspond à la fraction du total de celles-ci qui pénètre dans le sol ou demeure à la surface, ce qui contribue à humidifier la rhizosphère ou à intensifier l'évapotranspiration des végétaux. Les précipitations ne sont pas efficaces soit lorsqu'elles ruissellent directement par un phénomène de drainage superficiel, soit lorsqu'elles passent à travers la rhizosphère, atteignent la nappe souterraine et se drainent en sous-sol.

Voici quelques-uns des facteurs qui régissent l'efficacité des précipitations :

- la hauteur totale des précipitations ainsi que leur durée et leur fréquence
- l'évapotranspiration potentielle (l'évaporation à partir du sol ainsi que la transpiration des cultures, un phénomène qui peut survenir si l'humidité est suffisante)
- le degré d'humidité du sol
- le type de précipitations (pluie ou neige)
- l'état du sol (sol gelé ou non, sol formant des croûtes ou craquelé en surface, présence de lentilles de glace ou d'une couverture de

neige ou de glace, sol travaillé ou encore portant des chaumes ou de la végétation)

- les propriétés pédologiques liées à la texture du sol, qui ont des répercussions du point de vue de la capacité d'infiltration et de stockage de l'humidité ainsi que les pertes d'humidité de la rhizosphère par percolation.

C.2.2 Évapotranspiration

La teneur en eau du sol au printemps, conjuguée à la hauteur effective des précipitations durant la saison, représente la quantité d'eau naturellement disponible pour les cultures. Il s'agit d'un paramètre essentiel qui détermine la quantité supplémentaire d'eau qu'il est souhaitable d'apporter par irrigation.

L'évapotranspiration, ET, est la mesure dans laquelle l'eau est consommée par les cultures; elle ne peut être supérieure à la somme des précipitations effectives et de la teneur en eau du sol. Lorsque les besoins des cultures dépassent la quantité d'eau ainsi disponible, les végétaux se flétrissent et meurent si l'on ne leur apporte pas un supplément d'humidité par irrigation. De plus, même si les plantes n'atteignent pas leur point de flétrissement, le rendement des cultures n'arrivera pas à son plein potentiel en deçà d'un seuil minimum de teneur en eau du sol.

À l'inverse des précipitations, l'évapotranspiration est un phénomène qui se quantifie normalement par calcul plutôt que par des mesures. Cela tient au fait que les techniques de mesure sont généralement coûteuses et complexes et que ce paramètre dépend non seulement des facteurs climatiques mais aussi de l'état du sol et des végétaux. De nombreuses techniques de calcul permettent d'évaluer l'évapotranspiration et elles donnent parfois des résultats très différents.

Toutes les techniques d'évaluation se fondent sur une ET potentielle de référence (ETP_r) des cultures. Pour se faire une idée de la quantité d'eau qui est absorbée par les cultures, il faut

ajuster l'ET potentielle de référence mensuelle qui a été estimée afin d'aboutir à une ET potentielle de la culture (ETP) au moyen de facteurs de culture appropriés. La méthode d'évaluation de l'ET potentielle de référence doit être compatible avec les facteurs de culture que l'on prend en compte. De plus, la validité d'une méthode peut fluctuer d'une région à l'autre, et l'on peut avoir étudié ou calibré des méthodes différentes d'une région à l'autre. Quoi qu'il en soit, il est souvent souhaitable d'utiliser plusieurs méthodes pour pouvoir déterminer quels sont les écarts dans les résultats qu'elles donnent et choisir celle qui convient le mieux.

Les considérations précitées nous ont amenés à décider qu'il ne fallait pas incorporer dans le sous-modèle une méthode d'évaluation de l'ET potentielle de référence. Il est en effet souvent possible de trouver dans des études précédentes de telles estimations ainsi qu'une indication des facteurs de culture dont il convient de tenir compte. Il est également possible d'arriver par déduction à des estimations en s'appuyant sur les données de stations climatologiques choisies. Dans les endroits où l'on n'a pas mis au point d'estimations ou de méthodes appropriées, on recommande fortement de recourir à l'une des méthodes de la FAO et d'appliquer les facteurs de culture correspondants (Doorenbos et Pruitt, 1975). Le choix d'une méthode donnée dépendra dans une large mesure de la disponibilité des données climatiques.

C.2.3 Efficacité de l'apport et de son absorption

L'efficacité de l'irrigation correspond à la proportion de la quantité totale d'eau d'irrigation qui sert effectivement à répondre aux besoins des cultures. Les facteurs physiques qui déterminent l'efficacité de l'irrigation comprennent les propriétés du sol, les méthodes d'irrigation, la conception et la préparation du champ, les niveaux d'évaporation, le type de canal et de réservoir d'irrigation (canal imperméabilisé ou non) ainsi que la qualité de la construction du système. Il est possible de quantifier approximativement ces facteurs dans une certaine

mesure. Toutefois, les facteurs d'exploitation, qui peuvent être à l'origine d'une inefficacité substantielle, sont quant à eux moins faciles à quantifier. Une mauvaise gestion et une mauvaise planification de l'irrigation peuvent déboucher sur des gaspillages substantiels, habituellement par ruissellement et par écoulement en bout de système.

L'efficacité de l'irrigation est un concept qui est bâti sur le même principe que celui de l'efficacité des précipitations. Il désigne l'eau apportée à des fins d'irrigation qui s'accumule sur le sol ou y pénètre et demeure à l'intérieur du sol ou dans les végétaux et la rhizosphère jusqu'à ce que l'évapotranspiration la dissipe. L'apport efficace d'eau d'irrigation représente la fraction efficace de la quantité totale d'eau d'irrigation qui est amenée dans un champ. Comme c'est le cas pour les précipitations, la fraction non efficace est évacuée par drainage souterrain soit directement par ruissellement, soit par percolation à travers la rhizosphère.

L'eau est amenée jusqu'au champ par dérivation depuis le cours d'eau puis par un système d'apport qui peut être composé de réservoirs, de canaux, d'aménagements hydrauliques, de fossés et de conduites. Une certaine quantité d'eau est également perdue durant son passage à travers ce système, et l'apport efficace est donc constitué par la fraction de la quantité totale d'eau dérivée qui parvient effectivement jusqu'au champ. Les pertes sont dues à l'évaporation, au suintement et au ruissellement qui est drainé à l'extrémité des canaux. Certaines études donnent une définition distincte de l'efficacité de la conservation et de l'efficacité de la distribution. L'efficacité de l'apport représenterait donc la combinaison de ces deux efficacités.

L'efficacité globale de l'irrigation dans une zone est par conséquent le produit de l'efficacité de l'apport et de l'efficacité de l'application et correspond à la fraction efficace de la quantité totale d'eau qui a été dérivée.

C.2.4 Niveau d'irrigation

La partie C.2.2 indique qu'il faut que la teneur en eau du sol soit supérieure à un seuil minimum pour que les cultures puissent atteindre leur rendement potentiel maximum. Cela suppose bien sûr que d'autres facteurs comme la fertilisation, les mesures de lutte contre les ravageurs et les méthodes culturales en général sont également optimaux.

Pour être optimale, l'irrigation doit maintenir une teneur en eau optimale du sol qui fera que le plein potentiel d'évapotranspiration sera réalisé. Une étude de l'irrigation par arroseur rotatif effectuée en Alberta (Pohjakas, 1981) a montré que l'on ne parvenait pas à optimiser l'irrigation. On a pu déduire de l'analyse des essais menés sur le terrain que le niveau moyen d'irrigation correspondait à environ 50 % du niveau optimal pour toutes les cultures de pleine saison. Il s'agit là d'une caractéristique importante des méthodes d'irrigation utilisées dans les prairies canadiennes qui trouve son origine dans de nombreux facteurs techniques, économiques et sociaux.

Il est nettement plus difficile de modéliser les répercussions d'une irrigation sub-optimale que de supposer que les niveaux d'irrigation sont constamment optimaux, mais l'on a estimé que c'était dans ce cas essentiel si l'on désirait atteindre un degré raisonnable d'exactitude.

C.2.5 Degré de salinité des eaux d'irrigation

Une certaine quantité de sels est toujours dissoute dans l'eau avec laquelle on irrigue les cultures. Par contre, l'eau consommée par les cultures durant l'évapotranspiration est pratiquement exempte de sels. Par conséquent, on peut en déduire que le processus d'évapotranspiration entraîne une accumulation de sels dans la rhizosphère qui a pour effet de réduire la quantité d'eau absorbée par la plante. Une accumulation excessive de sels peut être préjudiciable aux végétaux et conduire à une baisse des rendements, voire même à un rendement nul.

La conductivité spécifique (salinité) de l'eau d'un cours d'eau, qui alimente un système d'irrigation et reçoit l'écoulement restitué par les zones irriguées, aura tendance à augmenter d'amont en aval. Par conséquent, les dérivations servant à irriguer les exploitations situées en aval contiendront une eau plus saline que celles qui irriguent les champs amont.

Plus l'eau d'irrigation est saline et plus il s'accumulera de sels dans le sol. Toutefois, les niveaux critiques de concentration en sels varieront en fonction du type de culture et des rendements que l'on cherchera à obtenir.

L'excès de sels peut être lessivé de la rhizosphère par l'eau qui percole à travers le sol jusqu'à la nappe souterraine et au réseau de drainage souterrain. Une certaine partie des précipitations et de l'eau d'irrigation percole ainsi vers le bas et, dans de nombreuses régions du monde où l'on pratique l'irrigation, cette eau suffit à préserver un bilan salin acceptable dans le sol sans qu'il soit nécessaire d'apporter davantage d'eau.

Dans le contexte canadien, où l'eau d'irrigation est de grande qualité et où des périodes de précipitations modérément fortes facilitent le lessivage, on ne considère pas que le calcul du bilan salin soit une priorité dans le cadre du sous-modèle d'irrigation. Toutefois, afin que celui-ci soit complet, on y a incorporé un programme simple d'évaluation du lessivage. Ce programme peut être utile pour vérifier quels peuvent être les effets d'un éventuel accroissement de la salinité de l'eau.

C.3 CONSIDÉRATIONS PRINCIPALES

Plusieurs questions liées à l'élaboration de l'élément irrigation du WUAM ont été analysées dans les parties précédentes. Les considérations qui sont particulièrement pertinentes du point de vue de la structure effective du modèle sont passées en revue ci-après.

C.3.1 Zones d'irrigation

Dans le WUAM, tous les calculs sont effectués au palier des bassins secondaires, chacun de ceux-ci correspondant à une station de

jaugeage de l'écoulement au point aval. Si le bassin secondaire comprend de vastes zones d'irrigation structurées et que l'on dispose pour chacune d'elles d'archives au sujet de l'utilisation de l'eau, des cultures et des autres facteurs en rapport avec l'irrigation, il sera nécessaire de traiter chacune de ces zones séparément dans le cadre de l'analyse de l'utilisation de l'eau. Par conséquent, il a été décidé que le sous-modèle ne pouvait fonctionner à l'échelle d'un bassin secondaire et que la simulation devait plutôt être effectuée par zone d'irrigation.

On remarquera que ce type de division n'est pas nécessairement le plus approprié pour les bassins hydrographiques où l'on ne trouve pas de zones d'irrigation structurées. La simulation peut être effectuée à l'échelle des bassins secondaires mêmes, des districts de recensement ou des comtés. Il est possible de donner une telle souplesse au sous-modèle parce que l'on ne subit pas la contrainte qu'entraîne la présence d'une station de jaugeage. Toutefois, pour harmoniser la simulation avec celle du modèle principal, il faudra toujours identifier les bassins secondaires qui fournissent de l'eau ou en reçoivent ainsi que les proportions auxquelles correspondent ces écoulements.

C.3.2 Saison d'irrigation

Tel qu'indiqué précédemment, les variétés de pleine saison sont en général cultivées au Canada de mai à septembre. Il a toutefois été décidé de faire de la saison d'irrigation une variable du modèle puisque cela augmente sa souplesse et accroît ses possibilités d'application.

C.3.3 Unité temporelle

Le sous-modèle d'irrigation a principalement pour but de fournir des estimations des quantités d'eau dérivées à des fins d'irrigation (et des écoulements restitués). Une fois acquise, cette information est combinée avec les données relatives aux autres utilisations de l'eau qui ont été traitées par le modèle principal. Afin de maintenir la compatibilité entre eux, l'unité temporelle du

modèle principal, c'est-à-dire le mois, est également employée dans le sous-modèle d'irrigation. Le mois n'est peut-être pas une unité qui permet d'intégrer les effets de modifications rapides des taux de croissance des cultures et de la teneur en eau des sols durant une saison, mais l'on estime que cette unité est adéquate compte tenu de la raison d'être fondamentale du modèle, qui est de servir d'outil de planification.

C.3.4 Précipitations et évapotranspiration

À l'inverse de ce qui est le cas pour les autres utilisations de l'eau, l'irrigation dépend fortement des fluctuations du climat. Les précipitations peuvent varier considérablement d'une année à l'autre et elles constituent donc le facteur qui revêt le plus d'importance du point de vue de l'évaluation de la demande en eau à des fins d'irrigation. L'évapotranspiration potentielle, qui subit l'influence des facteurs climatiques, peut elle aussi connaître de substantielles variations d'une année à l'autre.

On a donc choisi de tenir compte des variations aussi bien des précipitations que de l'évapotranspiration potentielle en suivant une démarche similaire à celle qui a été adoptée dans le cadre du modèle principal pour la simulation des conditions d'écoulement. Le modèle principal s'appuie sur l'intégralité des données historiques sur les écoulements mensuels naturels à chaque station de jaugeage. De la même façon, le sous-modèle d'irrigation a été conçu pour évaluer les utilisations de l'eau d'irrigation d'une année sur l'autre et d'un mois à l'autre sur la base des données historiques sur les précipitations et l'évapotranspiration potentielle.

C.3.5 Différents paramètres

Après les précipitations et l'évapotranspiration potentielle de référence, les principaux paramètres d'analyse de l'utilisation de l'eau à des fins d'irrigation sont le type de culture, le type de sol et le type de système d'irrigation. Il a été établi que l'on pourrait soit se procurer facilement les informations concernant la

répartition de chacun de ces paramètres dans une zone d'irrigation, soit obtenir relativement aisément une approximation de ces facteurs. Il était par contre impossible de subdiviser chaque zone en parcelles qui seraient chacune spécifiquement définies par l'ensemble des trois caractéristiques sans tout d'abord procéder à des recherches poussées. De plus, même si cette tâche avait été réalisable, le grand nombre de parcelles que l'on aurait ainsi définies aurait une fois encore amené à faire traiter par le modèle une quantité excessive de données.

Les paramètres spécifiques aux cultures sont les plus nombreux et aussi ceux qui peuvent être définis avec le plus de certitude. Par contre, les paramètres pédologiques, qui sont importants, sont liés à la texture du sol dont on ne peut, au mieux, connaître la répartition qu'approximativement, sauf à une échelle très restreinte. Les paramètres qui présentent un intérêt en ce qui concerne les types de système d'irrigation sont les paramètres d'exploitation auxquels on ne peut, dans ce cas également, qu'attribuer une valeur approximative.

On a par conséquent décidé de ne subdiviser les zones d'irrigation que par type de culture. Toutefois, la répartition des types de sol et des types de système d'irrigation à l'intérieur d'une zone d'irrigation est utilisée pour produire des valeurs représentatives uniques de chaque paramètre en pondérant les valeurs des paramètres en fonction de la superficie.

C.3.6 Variations des paramètres

On s'est efforcé de donner au modèle la plus vaste capacité possible d'analyse de scénarios ultérieurs de substitution. Les paramètres suivants, séparément ou combinés de n'importe quelle manière, sont considérés comme ceux qu'il est le plus utile de faire varier dans le cadre de telles analyses :

- la superficie irriguée
- la composition des cultures

- la composition des méthodes d'irrigation
- l'efficacité de l'apport en eau
- l'efficacité de la répartition par type de système d'irrigation
- le niveau d'irrigation par type de culture et de système d'irrigation
- le degré de salinité de l'eau d'irrigation

C.4 DESCRIPTION DU MODÈLE

C.4.1 Ordinogramme

L'ordinogramme de la figure C-1 donne une description du sous-modèle. Il est fait référence à l'ordinogramme dans les paragraphes pertinents des parties C.4.2 à C.4.7 qui suivent. Ces dernières décrivent les données nécessaires au sous-modèle et le processus logique de celui-ci.

C.4.2 Données nécessaires

On trouvera une description détaillée des données nécessaires à la mise en oeuvre du sous-modèle d'irrigation dans Kassem (1992, annexe D). Trois groupes fondamentaux de fichiers de données doivent être incorporés au sous-modèle : les données générales, les données sur la zone d'irrigation et les données climatiques. Les données générales sont celles que l'on estime être universellement applicables à toutes les zones d'irrigation de la région étudiée. Elles figurent dans la base de données générales du modèle principal (voir Kassem 1992, annexe D1). Les données sur la zone d'irrigation sont celles qui diffèrent d'une zone d'irrigation à l'autre. Elles servent aussi de base à des scénarios qui peuvent être modifiés au besoin afin de pouvoir analyser des conditions futures. Ce type de données est décrit en détail dans Kassem (1992, annexe D6). Les données climatiques sont représentées par les relevés mensuels de précipitations et d'évapo-transpiration potentielle de référence. Elles sont décrites dans Kassem (1992), annexes D7 et D8 respectivement. La partie qui suit récapitule les données primaires.

C.4.2.1 Données générales

On estime que les données générales sont universellement valables pour la région étudiée et qu'il n'est pas nécessaire de les modifier d'une simulation à l'autre. Elles comprennent notamment les paramètres de culture, les paramètres pédologiques et les paramètres d'irrigation.

- a) Nombre total de cultures ou types de culture.
- b) Informations sur chaque culture ou type de culture :
 - facteurs de culture mensuels : CF
 - fraction minimum de diminution optimale de la teneur en eau du sol : DFO_{\min}
 - fraction maximum de diminution optimale de la teneur en eau du sol : DFO_{\max}
 - deux constantes d'évaluation de DFO_{\max} : DFA et DFB
 - facteur d'ajustement mensuel de DFO_{\max} : DFOA
 - profondeur maximum de la rhizosphère : RD_{\max} (m)
 - facteur d'ajustement de la profondeur de la rhizosphère pour RD_{\max} : RDA
 - salinité maximum du sol pour un rendement potentiel des cultures de 90 % : $ECEN_{\max}$ (mmho/cm)
 - salinité maximum du sol pour un rendement potentiel des cultures de 0 % : $ECEZ_{\max}$ (mmho/cm)
 - facteur d'ajustement de la salinité du sol pour $ECEN_{\max}$ et $ECEZ_{\max}$: ECEA
 - trois constantes d'évaluation de l'ET effective des cultures : DF95, DF10 et ETF80
- c) Nombre total de types de sol.
- d) Informations sur chaque type de sol :
 - réserve en eau utile du sol : SC (mm/m)
 - efficacité du lessivage : EL (%)

- efficacité de la percolation : EP (%)

- e) Nombre total de types de système d'irrigation.
- (f) Informations sur chaque type de système d'irrigation :
 - code de fréquence de l'apport : 1 = fréquent, 2 = peu fréquent.

C.4.2.2 Données sur la zone d'irrigation

Une série de données spécifiques doit être compilée pour chaque zone d'irrigation. Ces données comprennent les données du scénario, qui seraient modifiées comme il convient lors de l'analyse de scénarios de substitution.

- superficie irriguée totale : AT (ha)
- pertes dues à l'évaporation durant le transport : ELD (%)
- efficacité de l'apport : ED (%)
- degré de salinité mensuel de l'eau d'irrigation : ECW (mmho/cm)
- nombre de cultures ou de types de culture pris en considération
- informations sur chaque culture ou type de culture :
 - pourcentage de la zone qui est cultivé : AP_c (%)
 - niveau d'irrigation spécifique à la culture : ILC (%)
- nombre de types de sol pris en considération
- informations sur chaque type de sol
 - pourcentage de type de sol : AP_s (%)
- nombre de types de système d'irrigation pris en considération
- informations sur chaque type de système d'irrigation
 - pourcentage de la zone par type de système d'irrigation : AP_i (%)
 - efficacité de l'absorption : EA (%)
 - ajustement du niveau d'irrigation en fonction du type de système d'irrigation : ILCA
- efficacité de l'absorption des précipitations durant la saison : EAR (%)

C.4.2.3 Données sur les précipitations et l'évapotranspiration potentielle de référence

En plus de réunir une série de données sur la zone d'irrigation, il faut associer chacune des zones d'irrigation à une série distincte de données relatives aux précipitations mensuelles, P, et à l'évapotranspiration potentielle mensuelle de référence, ETP_r . Il faut disposer de données sur les précipitations et sur l'évapotranspiration pour chacune des années faisant l'objet d'une analyse. L'évapotranspiration potentielle de référence n'a pas été incorporée au reste des données sur la zone d'irrigation afin d'offrir la possibilité de la calculer d'avance à partir des données climatiques.

C.4.3 Évaluation des paramètres

C.4.3.1 Paramètres pondérés

Aussi bien pour les paramètres de type de sol que de type de système d'irrigation, une seule valeur hypothétique représentative de l'ensemble de la zone d'irrigation est dérivée sur la base des moyennes pondérées de la zone. En ce qui concerne la réserve en eau utile et l'efficacité de l'absorption, par exemple, les paramètres pondérés SC_w et EA_w s'établiraient comme suit :

$$SC_w = SC \times (AP_s/100) \text{ et}$$

$$EA_w = EA \times (AP_i/100),$$

respectivement. AP_s et AP_i représentent les pourcentages de type de sol et de type de système d'irrigation dans l'ensemble de la zone irriguée. Les autres paramètres pondérés qui sont calculés de cette façon sont l'efficacité du lessivage, EL_w , l'efficacité de la percolation, EP_w , et l'ajustement du niveau d'irrigation en fonction du type de système d'irrigation, $ILCA_w$. On calcule également les pourcentages de l'ensemble de la zone où les fréquences de répartition de l'eau d'irrigation sont fortes et faibles, AP_{ih} et AP_{il} , respectivement.

C.4.3.2 Paramètres des cultures et de la rhizosphère

Les paramètres des cultures et de la rhizosphère comprennent un ajustement du niveau d'irrigation et des valeurs mensuelles de l'évapotranspiration potentielle des cultures, de la fraction maximum de diminution optimale de la teneur en eau, de la profondeur de la rhizosphère et des profondeurs d'absorption de l'irrigation.

a) Ajustement du niveau d'irrigation

L'ajustement du niveau d'irrigation, ILA , correspond au niveau d'irrigation spécifique à la culture, ILC , tel qu'il est modifié sur la base de l'ajustement du niveau d'irrigation en fonction du type de système d'irrigation, $ILCA_w$

$$ILA = ILC \times ILCA_w (\%)$$

L'ajustement du niveau d'irrigation en fonction du type de système d'irrigation, $ILCA$, tient compte des effets propres au type de système d'irrigation qui s'exercent sur le niveau d'irrigation que l'on doit prendre en considération. Par conséquent, le niveau d'irrigation ajusté reflète les différences entre les types de culture d'une part et entre les types de système d'irrigation d'autre part. Le ILA est limité à une proportion maximale de 100 %.

b) Évapotranspiration potentielle des cultures

L'évapotranspiration potentielle mensuelle des cultures, ETP_c , se calcule en appliquant des facteurs mensuels de culture, CF , à l'évapotranspiration potentielle mensuelle de référence, ETP_r

$$ETP_c = CF \times ETP_r \text{ (mm)}$$

On remarquera que l'évapotranspiration potentielle de référence correspond à une culture de référence pleinement développée et en pleine croissance, normalement de l'herbe ou de la luzerne, et que les facteurs de culture qui

la modifient doivent correspondre à la culture de référence appropriée et à la méthode d'évaluation employée. L'évapotranspiration potentielle de référence est évaluée pour n'importe quel moment de l'année, mais ce phénomène ne peut avoir lieu que lorsque les conditions présumées prévalent effectivement. Au Canada, cela ne peut être qu'au milieu de la saison de culture, et même alors uniquement temporairement en ce qui concerne l'herbe ou la luzerne si ces plantes sont coupées lorsqu'elles sont arrivées à maturité. D'un autre côté, l'évapotranspiration potentielle des cultures est un phénomène qui peut prévaloir à n'importe quel moment lorsque le sol est suffisamment humide. Cela tient au fait que les facteurs de culture appliqués à l'évapotranspiration potentielle de référence tiennent compte des variations aussi bien des types de culture que des étapes de développement de celles-ci.

Un facteur de culture doit être choisi pour chacun des mois de la saison de culture pour laquelle l'irrigation fait l'objet d'une évaluation. Si la culture est plantée en retard ou si elle est précocement récoltée, les facteurs de culture correspondant aux mois qui précèdent ou suivent la période de croissance devraient correspondre à un sol laissé à nu.

c) Fractions de diminution optimale de la teneur en eau

La fraction maximum de diminution optimale de la teneur en eau du sol, DFO_{max} , représente la fraction d'humidité du sol potentiellement disponible dans la rhizosphère qui peut diminuer sans amener l'évapotranspiration effective de la culture à chuter en dessous de l'évapotranspiration potentielle. On attribue souvent une valeur de 0,5 à cette fraction mais elle dépend en fait aussi bien du type de culture que de l'évapotranspiration potentielle de la culture et, à un moindre degré, du type de sol et du stade de croissance de la culture.

Les valeurs de DFO_{max} pour quatre groupes de cultures ainsi que pour toute une gamme

d'évapotranspirations potentielles des cultures peuvent être obtenues de la FAO (Doorenbos et Pruitt, 1975; Doorenbos et Kassam, 1979). Ces valeurs sont données pour une culture parvenue à maturité. Les données ont été ajustées à des courbes de puissance, une par groupe de cultures, et l'on s'est arrangé pour pouvoir appliquer des facteurs d'ajustement mensuel, $DFOA$, pour tenir compte du stade de croissance. L'équation qui en résulte se lit comme suit :

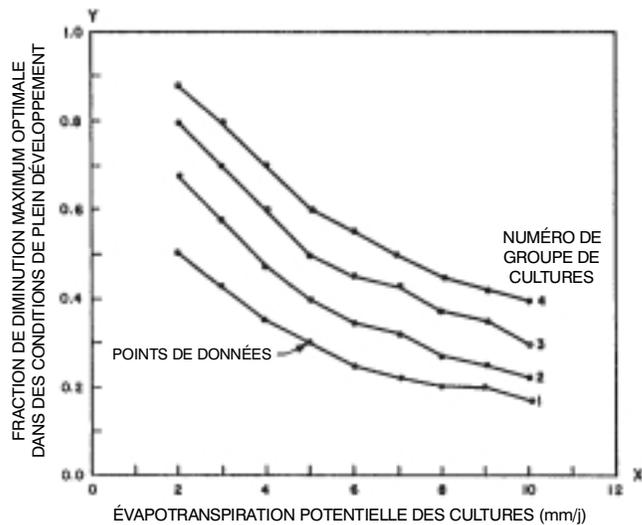
$$DFO_{max} = [DFA (ETP_c / NDM)^{DFB}] \times DFOA$$

où DFA et DFB sont des constantes de courbe de puissance (voir figure C-2) et NDM représente le nombre de jours dans le mois.

Il est possible de définir une valeur constante de DFO_{max} pour chaque culture. Une telle valeur est incorporée à la base de données et serait utilisée si aucune valeur n'était assignée aux constantes de la courbe de puissance.

DFO_{max} augmente à mesure que ETP_c diminue (le signe de DFB est négatif dans l'équation ci-dessus). Dans certains cas où la valeur de ETP_c est très faible, par exemple au début de la saison de croissance, cette équation donne des valeurs beaucoup trop élevées pour DFO_{max} . Par conséquent, DFO_{max} a été limité à une valeur de la fraction de diminution correspondant à une évapotranspiration effective de la culture égale à 95 % de l'évapotranspiration potentielle. Cette notion est explorée plus en détail dans la partie C.4.5.2.

En plus de DFO_{max} , on utilise une fraction minimum de diminution optimale de la teneur en eau du sol, DFO_{min} . Cette fraction est définie comme une constante pour chaque culture. Elle permet de tenir compte des méthodes d'irrigation qui peuvent chercher à maintenir une humidité optimale dans le sol sans pour autant éliminer totalement les déficits de



AJUSTEMENT DE LA COURBE DE PUISSANCE				
GROUPE DE CULTURES	1	2	3	4
DFA	0,854	1,188	1,309	1,353
DFB	-0,677	-0,695	-0,602	-0,517
COEF. DE CORR.	0,986	0,982	0,977	0,977

GROUPE DE CULTURES	CULTURES
1	OIGNONS, POIVRONS, POMMES DE TERRE
2	BANANES, CHOUX, RAISINS, PETITS POIS, TOMATES
3	LUZERNE, HARICOTS, AGRUMES, ARCHIDES, ANANAS, TOURNESOL, PASTÉQUES, BLÉ
4	COTON, MAÏS, OLIVES, CARTHAME, SORGHO, SOJA, BETTERAVE À SUCRE, CANNE À SUCRE, TABAC

SOURCE :
DOORENBOS ET KASSAM, 1979

ÉQUATION DE LA COURBE DE PUISSANCE :
 $Y = DFA \times X^{DFB}$

Figure C-2. Courbes de diminution maximums optimales.

rétenion. Il est en effet plus facile d'accéder aux cultures et de travailler dans les champs qui viennent d'être irrigués lorsqu'on les laisse s'assécher un peu.

d) Profondeur de la rhizosphère

La profondeur de la rhizosphère est la profondeur jusqu'à laquelle les racines peuvent aller chercher l'humidité qui entretient l'évapotranspiration. Tout comme l'évapotranspiration potentielle des cultures, la profondeur de la rhizosphère dépend du stade de croissance atteint par les cultures. La profondeur mensuelle de la rhizosphère, RD, de chaque culture est calculée en fonction de la profondeur maximum de la rhizosphère, RD_{max} , telle qu'elle est pondérée par des facteurs d'ajustement de la profondeur mensuelle de la rhizosphère, RDA.

$$RD = RD_{max} \times RDA \text{ (m)}$$

e) Profondeurs d'irrigation

La profondeur d'irrigation correspond à la profondeur à laquelle l'eau amenée dans un champ pénétrera pleinement dans le sol et demeurera dans la rhizosphère où elle pourra être puisée par les cultures. Elle se définit par rapport à la profondeur de la rhizosphère, RD, à une capacité de rétention pondérée, SC_w , ainsi que par rapport à la diminution souhaitée et effective de la teneur en eau.

La réserve en eau utile, SC, définit la mesure dans laquelle le sol peut stocker une humidité que les plantes pourront facilement utiliser. Elle ne correspond pas à l'espace poral total qui pourrait être occupé par de l'eau. Lorsque le sol atteint un degré d'assèchement que l'on appelle le point de flétrissement, les cultures ne parviennent plus à en extraire l'humidité. Lorsqu'il arrive à un degré de teneur en eau qui ne peut plus être dépassé, ce que l'on appelle la capacité de rétention ou la capacité au champ, tout apport d'eau

supplémentaire ne peut être conservé dans la rhizosphère. La réserve en eau utile se situe donc entre la capacité de rétention et le point de flétrissement, parfois exprimé en proportion du volume du sol ou, dans ce cas, en termes de rapport entre la profondeur d'absorption de l'eau et la profondeur du sol (mm/m).

On évalue la quantité totale d'eau qui peut être acceptée par la rhizosphère sur la base de la profondeur de cette dernière et de la réserve en eau utile. La profondeur d'irrigation est donc une quantité égale ou inférieure à cette quantité totale. Dans le cadre du module, trois profondeurs d'irrigation ont été définies.

- une profondeur type d'irrigation, DIS, qui porterait la teneur en eau de la rhizosphère de son niveau maximum de diminution optimale de la teneur en eau à la capacité au champ

$$DIS = DFO_{\max} \times SC_w \times RD \text{ (mm)}$$

- la profondeur optimale d'irrigation, DIO, qui ferait remonter la teneur en eau de la rhizosphère entre ses niveaux maximum et minimum optimaux

$$DIO = (DFO_{\max} - DFO_{\min}) \times SC_w \times RD \text{ (mm)}$$

- la profondeur réelle d'irrigation, DIA, qui modifierait la profondeur optimale d'irrigation en fonction du niveau d'irrigation ajusté

$$DIA = DIO \times (ILA/100) \text{ (mm)}$$

C.4.3.3 Paramètres de lessivage

Les besoins en lessivage sont évalués pour chaque culture et dans le cadre de deux scénarios différents de fréquence d'irrigation. Une irrigation importante nécessite un accroissement des intervalles entre les irrigations. La méthode FAO/Rhodes a été employée (Ayers et Westcot, 1976; Doorenbos et Pruitt, 1975).

On considère que les salinités maximums du sol, $ECEN_{\max}$ et $ECEZ_{\max}$, pour lesquelles le rendement potentiel des cultures est respectivement de 90 % et 0 %, s'appliquent à des cultures parvenues à maturité. Des facteurs d'ajustement mensuel de la salinité, ECEA, sont ensuite appliqués pour obtenir des degrés correspondants de salinité mensuelle tolérables, ECEN et ECEZ, pour chacun des deux niveaux de rendement des cultures

$$ECEN = ECEN_{\max} \times ECEA \text{ (mmho/cm)}$$

$$ECEZ = ECEZ_{\max} \times ECEA \text{ (mmho/cm)}$$

Les degrés mensuels de salinité tolérables indiqués ci-dessus ainsi que le degré de salinité de l'eau d'irrigation, ECW, de même que l'efficacité pondérée du lessivage, EL_w , servent à évaluer les fractions de lessivage nécessaires, LRFN et LRFZ, correspondant respectivement aux fréquences de faible et de forte irrigation :

$$LRFN = [ECW / (5 \times ECEN - ECW)] \times (100 / EL_w)$$

$$LRFZ = [ECW / (2 \times ECEZ)] \times (100 / EL_w)$$

L'efficacité de lessivage, EL, est la proportion de la quantité totale d'eau percolée qui dissout et emporte effectivement les sels de la rhizosphère. L'efficacité de lessivage varie substantiellement d'un type de sol à l'autre, passant de 30 % pour les argiles lourdes à 100 % pour le sable (Doorenbos et Pruitt, 1975).

On calcule ensuite une fraction pondérée du lessivage moyen nécessaire, LRF, en appliquant les pourcentages appropriés de superficie totale aux fréquences de faible et forte irrigation, AP_{ih} et AP_{il}

$$LRF = LRFN \times (AP_{il}/100) + LRFZ \times (AP_{ih}/100)$$

Obtenue de la façon décrite ci-dessus, la fraction de lessivage nécessaire représente la fraction de la quantité totale d'eau qui rentre dans le sol. Le lessivage nécessaire à la culture, LR_c , est donc le produit de la fraction de lessivage

nécessaire et de la quantité totale d'eau qui pénètre dans le sol. Si cette quantité totale d'eau devait être parfaitement adaptée aussi bien à l'évapotranspiration potentielle de la culture, ETP_c , qu'au lessivage nécessaire à la culture, LR_c , elle serait égale à la somme des deux. Le lessivage nécessaire à la culture s'obtient donc par la formule suivante

$$LR_c = LRF \times (ETP_c + LR_c) \text{ (mm)}$$

qui, lorsqu'elle intègre LR_c , devient

$$LR_c = [LRF / (1 - LRF)] \times ETP_c \text{ (mm)}$$

C.4.4 Précipitations

Ayant achevé tel que décrit ci-dessus l'évaluation des paramètres pour une zone d'irrigation, le module fournit ensuite des évaluations année par année, mois par mois et culture par culture. Un élément précipitations en saison et précipitations hors de saison est calculé pour chaque année. Les calculs pour l'année partent de janvier.

C.4.4.1 Précipitations hors de saison

Au début de chaque saison d'irrigation, on définit pour chaque culture une fraction initiale de diminution réelle de la teneur en eau du sol, DFAI. Pour les calculs portant sur la première année, cette fraction est fixée à 0,5 mais, les années suivantes, on tient compte de l'effet de la hauteur totale des précipitations hors de saison, PTO.

L'efficacité de l'absorption de la hauteur totale des précipitations hors de saison, EAPTO, correspond à la fraction des précipitations hors de saison qui pénètre effectivement dans la rhizosphère et qui y demeure, ce qui permet aux cultures de l'utiliser durant la saison suivante. Elle a été évaluée sur la base des résultats des recherches effectuées par Hobbs et Krogman (1971).

Les données rattachant l'EAPTO à la fraction finale réelle de la teneur en eau du sol, DFAF, telle

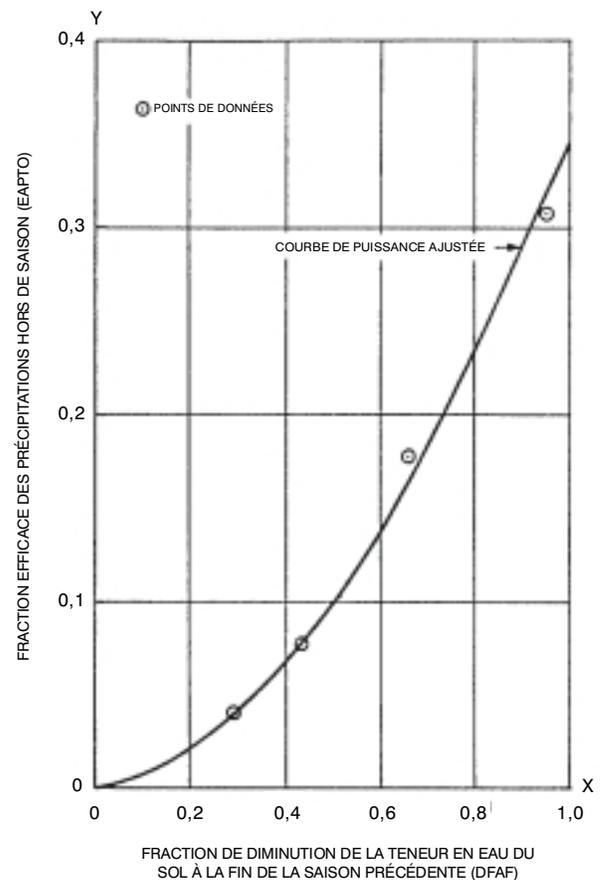
qu'évaluée à la fin de la saison précédente, ont été ajustées dans une courbe de puissance (voir figure C-3) :

$$EAPTO = 0,3448 \times DFAF^{1,7244}$$

Les précipitations réelles hors de saison sont donc établies de la façon suivante :

$$PTOE = EAPTO \times PTO \text{ (mm)}$$

la fraction de diminution de la teneur en eau étant réduite d'une quantité équivalente à la recharge assurée par la PTOE pour la profondeur



SOURCE :
HOBBS ET KROGMAN, 1971

ÉQUATION DE LA COURBE DE PUISSANCE :
 $Y = 0,3448 \times X^{1,7244}$
(COEFFICIENT DE CORRÉLATION - 0,9983)

Figure C-3. Efficacité d'absorption des précipitations hors de saison.

maximum de la rhizosphère de la culture à venir

$$DFAI = DFAF - PTOE / (SC_w \times RD_{max})$$

La valeur de la DFAI est considérée comme ne pouvant être qu'égale ou supérieure à zéro.

C.4.4.2 Précipitations en saison

La hauteur réelle des précipitations mensuelles en saison est évaluée dans le premier cas grâce à la méthode USDA/SCS (U.S. Department of Agriculture, 1967). Un facteur de profondeur d'absorption, DAF, est tout d'abord évalué d'après la profondeur type d'irrigation, DIS

$$DAF = 0,531747 + 0,295164 (DIS/25,4) - 0,057697 (DIS/25,4)^2 + 0,003804 (DIS/25,4)^3$$

On estime ensuite la hauteur réelle mensuelle des précipitations, RE1, sur la base des précipitations mensuelles, P, et de l'évapotranspiration potentielle mensuelle de la culture, ETP_c, ainsi que de DAF

$$RE1 = [0,70917 (P/25,4)^{0,82416} - 0,11556] \times 10^{0,02426} (ETP_c / 25,4) \times DAF \times 25,4 \text{ (mm)}$$

Les deux équations précitées sont tirées de la méthode USDA/SCS (U.S. Department of Agriculture, 1967) mais elles ont été modifiées en fonction du système métrique. On prend pour acquis que la hauteur mensuelle réelle des précipitations, telle qu'elle est établie ci-dessus, ne peut être supérieure aux précipitations mensuelles ou à l'évapotranspiration potentielle mensuelle de la culture.

On continue d'admettre de façon générale que la méthode exposée ci-dessus constitue la meilleure façon d'évaluer ce paramètre complexe. Toutefois, elle ne considère pas que des précipitations puissent être supérieures à l'évapotranspiration potentielle de la culture et néanmoins assurer la réalimentation de la rhizosphère. Pour cette raison, on procède à une deuxième évaluation des précipitations

mensuelles réelles, RE2, sur la base d'une valeur d'efficacité de l'absorption des précipitations en saison, EAR

$$RE2 = P \times (EAR/100) \text{ (mm)}$$

On part du principe que cette valeur ne peut être supérieure aux précipitations mensuelles.

On considère que la plus grande des deux estimations constitue la hauteur mensuelle réelle des précipitations, RE. Il s'agit là de la contribution des précipitations à l'évapotranspiration et à la réalimentation de la rhizosphère.

Il importe également d'évaluer dans quelle mesure les précipitations mensuelles contribuent au lessivage nécessaire. Cette contribution prend sa source dans la partie des précipitations qui passe par une percolation, RP, qui est elle-même un élément des précipitations non efficaces, RN.

On calcule les précipitations non efficaces en soustrayant les précipitations efficaces des précipitations totales

$$RN = P - RE \text{ (mm)}$$

ce qui fait que si RN est égal à zéro, RP l'est également. Dans le cas contraire, on combine l'efficacité de l'absorption réelle des précipitations, EARA, définie par la formule suivante

$$EARA = (RE/P) \times 100$$

et l'efficacité de la percolation pondérée, EP_w, pour déterminer quelle est la proportion des précipitations non efficaces qui est percolée

$$RP = [EP_w / (100 - EARA)] \times RN \text{ (mm)}$$

L'efficacité de la percolation, EP, correspond à la portion de la quantité totale d'eau reçue par le champ qui pénètre dans le sol mais ne demeure pas dans la rhizosphère puisqu'elle passe par percolation jusqu'au système de drainage souterrain. Elle dépend principalement du type

de sol mais elle subit l'influence de plusieurs autres facteurs, et notamment les types de système d'irrigation et de méthodes culturales. Les valeurs choisies peuvent parfois être incompatibles avec celles de l'efficacité de l'absorption, auquel cas ce sont ces dernières qui devraient primer.

Selon les valeurs choisies pour l'efficacité de la percolation, il se peut que l'on détermine que RP est supérieure à RN. Dans ce cas, les deux valeurs seront ramenées à égalité. On complète le bilan des précipitations en établissant quelle est la proportion qui ruisselle, RR, où

$$RR = RN - RP \text{ (mm)}$$

C.4.5 Irrigation des cultures et bilan hydrique du sol

On part du principe que la fraction initiale de diminution réelle de la teneur en eau du sol, DFAI, qui a été définie dans la partie C.4.4.1, s'applique à l'intégralité de la profondeur maximum de la rhizosphère de la culture, RD_{max} . Toutefois, dans les mois qui précèdent le moment où le système racinaire arrive à maturité, la plante ne peut tirer avantage de la teneur en eau du sol que jusqu'à la profondeur qu'a alors atteinte la rhizosphère, RD.

On considère que, au début de n'importe quel mois, la diminution réelle de la teneur en eau du sol, DMA, correspond à la diminution accumulée à la fin du mois précédent à l'intérieur de la rhizosphère de ce mois augmentée de la diminution survenue au début de la saison à l'intérieur de l'épaisseur supplémentaire acquise par la rhizosphère durant le mois en cours. La méthode est similaire à celle qu'ont retenue Burt et coll. (1981). Par conséquent

$$DMA = [DFAA \times SC_w \times RD_{(m-1)}] + [DFAI \times SC_w \times (RD_m - RD_{(m-1)})] \text{ (mm)}$$

Dans la formule précédente, DFAA représente la fraction de diminution réelle de la

teneur en eau du sol évaluée à la fin de chaque mois alors que m et (m - 1) renvoient respectivement au mois en cours et au mois précédent. Durant le premier mois de la saison, le premier terme de l'équation est égal à zéro alors que, une fois que la rhizosphère a atteint sa profondeur maximum, c'est le deuxième terme qui est égal à zéro.

C.4.5.1 Bilan hydrique optimal

À ce stade, on calcule un bilan hydrique pour le mois afin de déterminer quelle est l'importance de l'irrigation nécessaire à la culture durant ce mois. L'évaluation suppose que les méthodes d'irrigation sont optimales, ce qui signifie que

- les diminutions de la teneur en eau du sol sont maintenues entre les valeurs minimum et maximum optimales
- les profondeurs optimales d'irrigation définies dans la partie C.4.3.2 sont atteintes dans toutes les opérations d'irrigation
- l'évapotranspiration réelle de la culture est égale à l'évapotranspiration potentielle

Au terme du calcul du bilan hydrique optimal, la quantité d'eau que l'on a identifiée comme étant optimale pour le mois est pondérée par l'ajustement du niveau d'irrigation, ILA, pour aboutir à la quantité réelle d'eau nécessaire à l'irrigation durant le mois.

À cette fin, on fixe une diminution initiale optimale de la teneur en eau du sol pour le mois, DMOI, correspondant à la diminution réelle de la teneur en eau du sol, DMA, qui a été définie ci-dessus. On évalue ensuite la diminution finale optimale de la teneur en eau du sol pour le mois, DMOF, à partir des précipitations efficaces et de l'évapotranspiration potentielle de la culture en supposant initialement qu'aucune irrigation n'a été effectuée :

$$DMOF = DMOI - RE + ETP_c$$

Selon la valeur de DMOF, on choisit l'une des trois méthodes possibles suivantes, ainsi que résumé ci-après et comme le montre la figure C-4.

a) DMOF inférieure à zéro

Lorsque la DMOF est inférieure à zéro, un surplus de précipitations efficaces a donné une teneur en eau du sol finale supérieure à la capacité de rétention. Le surplus final optimal de teneur en eau du sol, SMOF, reçoit une valeur égale à celle de la DMOF avec un signe inversé alors que la DMOF est ramenée à zéro.

Si la rhizosphère du mois en cours a atteint sa profondeur maximum, le SMOF est ajouté à l'élément de percolation des précipitations, RP, précédemment évalué. Il est également soustrait des précipitations efficaces, RE. Dans le cas contraire, le surplus peut compenser la diminution dans la partie de la rhizosphère située en dessous de la profondeur déjà atteinte par les racines. Cela

signifie que la fraction initiale de diminution de la teneur en eau, DFAI, peut être réduite de la façon suivante dans la partie inexploitée de la rhizosphère.

$$DFAI = DFAI - \{SMOF / [SC_w \times (RD_{max} - RD)]\}$$

Si cette formule aboutit à une valeur négative de DFAI SC_w , c'est qu'il subsiste un surplus défini par

$$SMOF = -DFAI \times SC_w \times (RD_{max} - RD) \text{ (mm)}$$

et DFAI est alors ramenée à zéro. Le surplus est ensuite ajouté aux précipitations évacuées par percolation et soustrait comme précédemment des précipitations efficaces.

b) DMOF est égale ou supérieure à DIS

La profondeur type d'irrigation, DIS, correspond également à la diminution optimale

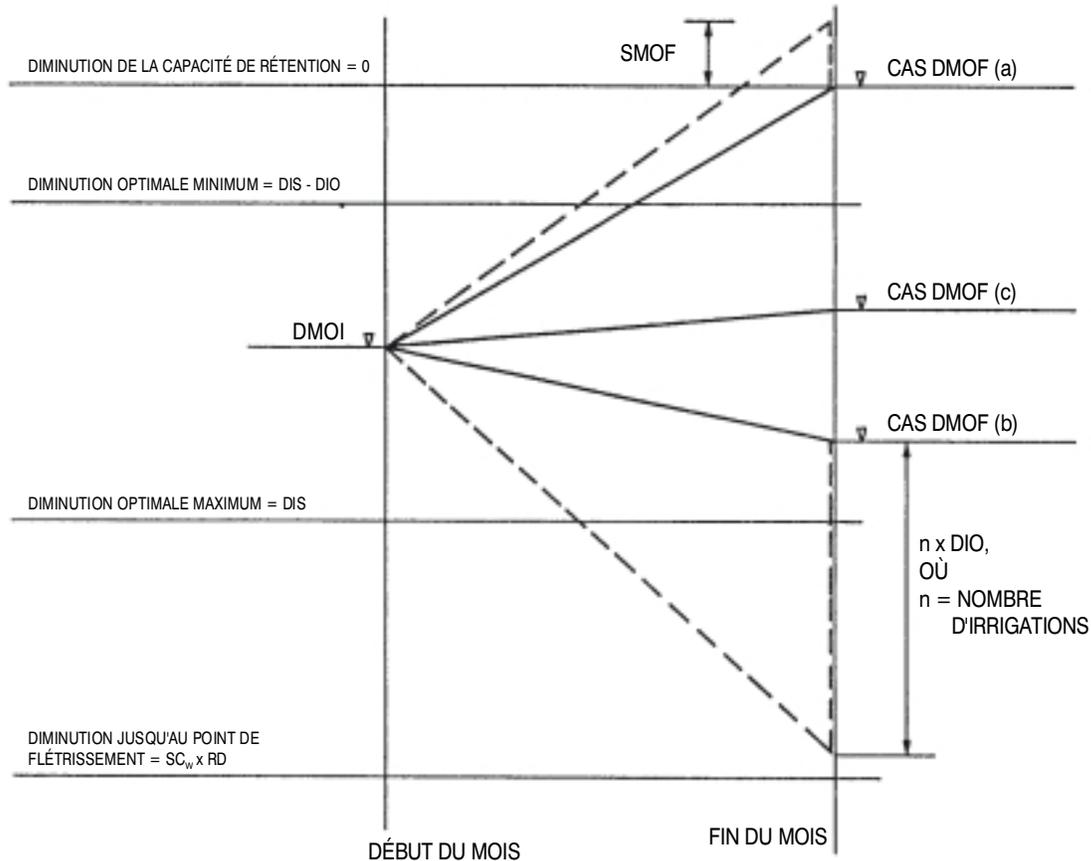


Figure C-4. Bilan hydrique optimal.

maximum. Si DMOF est supérieure à DIS, on peut conclure que l'irrigation était nécessaire durant le mois. Des apports successifs d'eau d'irrigation sont intégrés par unités de profondeur optimale d'irrigation, DIO, et DMOF est réduite dans des proportions identiques. Les quantités d'eau d'irrigation sont cumulées. Après chaque opération d'irrigation, DMOF est comparée à DIS, et les opérations d'irrigation se poursuivent jusqu'à ce que la valeur de DMOF soit inférieure à celle de DIS.

- c) La valeur de DMOF est comprise entre les deux limites précédentes

Lorsque la valeur de DMOF est comprise entre les deux limites précédentes, il n'y a ni surplus ni besoin d'irrigation, et la valeur de DMOF demeure donc inchangée.

Le degré de teneur en eau du sol au printemps revêt une importance considérable, et le principal facteur qui le régit est le degré de teneur en eau du sol prédominant à l'automne précédent. Une méthode d'irrigation optimale prévoirait un dernier apport d'eau à la fin de la saison qui aurait pour but d'amener la rhizosphère au niveau minimum optimal de diminution de la teneur en eau.

La diminution optimale minimum de la teneur en eau est équivalente à (DIS - DIO). Si, durant le dernier mois, la valeur de DMOF est supérieure à cette valeur de diminution, on ajoute une opération d'irrigation [DMOF - (DIS - DIO)] et l'on attribue à DMOF une valeur égale à (DIS - DIO). La méthode d'irrigation est également optimale si elle permet de fortes diminutions au moment de la récolte. Cela peut nécessiter d'introduire un critère distinct pour l'irrigation durant le mois de récolte. Toutefois, puisqu'il est souhaitable de faire remonter la teneur en eau à la suite de la récolte, tel qu'expliqué précédemment, la quantité totale d'eau apportée par irrigation demeurerait la même. Si la récolte a lieu avant le dernier mois de la saison, il se peut alors que les totaux de chacun des mois, tels qu'ils ont été évalués, ne reflètent

pas véritablement cette opération. Toutefois, on n'a pas estimé qu'un ajustement s'imposait dans ce cas.

Une fois que l'on est parvenu au bilan hydrique optimal, on utilise la valeur de l'irrigation mensuelle optimale cumulée, CMIO, pour définir la valeur de l'irrigation mensuelle réelle cumulée, CMIA, au moyen de l'ajustement du niveau d'irrigation de la culture, ILA

$$CMIA = CMIO \times (ILA/100) \text{ (mm)}$$

On détermine également la valeur de l'irrigation volumétrique mensuelle correspondante de la culture, CMIV, exprimée en millions de mètres cubes, sur la base de la superficie totale irriguée, AT, exprimée en hectares, du pourcentage de la superficie totale par type de culture, AP_c , et d'un facteur de conversion permettant d'harmoniser les unités.

$$CMIV = CMIA \times AT \times (AP_c/100)/10^5 \text{ (Mm}^3\text{)}$$

Si l'irrigation n'a pas été effectivement optimale (ILA inférieur à 100 %) ou si elle n'était de toute façon pas nécessaire (CMIO égale ou inférieure à zéro), on fixe la valeur de la diminution réelle de la teneur en eau du sol, DMA, à égalité de celle de DMOF. Toutefois, si tel n'était pas le cas, il devient nécessaire de déterminer quelles sont les répercussions d'une irrigation sub-optimale pour le degré de teneur en eau du sol, ainsi que l'explique la partie qui suit.

C.4.5.2 Bilan hydrique réel

On établit le bilan hydrique réel afin d'évaluer l'évapotranspiration mensuelle effective de la culture, ETA_c , sur la base de l'irrigation mensuelle réelle cumulée, CMIA, et de déterminer quelle est la diminution réelle de la teneur en eau du sol, DMA, qui y correspond.

On donne à la diminution initiale réelle de la teneur en eau du sol, DMAI, une valeur égale à celle de la diminution réelle de la teneur en eau du

sol, DMA, qui correspond à la valeur prévalant à la fin du mois précédent. On évalue une valeur d'essai de la diminution finale réelle de la teneur en eau du sol, DMAF, en supposant pour commencer que l'évapotranspiration réelle de la culture sera égale à l'évapotranspiration potentielle de la culture, ETP_c . Il est tenu compte à la fois des précipitations efficaces, RE, et de l'irrigation mensuelle réelle cumulée, CMIA.

$$DMAF = DMAI - RE - CMIA + ETP_c \text{ (mm)}$$

Il s'agit de comparer aussi bien la DMAI que la DMAF avec le niveau maximum optimal de diminution, c'est-à-dire DIS, afin de pouvoir déterminer approximativement si cette diminution a été dépassée et, dans l'affirmative, pendant combien de temps. On évalue le niveau de réduction correspondant de l'évapotranspiration durant cette période de dépassement, et l'on procède à une révision globale de l'estimation de l'évapotranspiration mensuelle effective de la culture, ETA_c . On obtient donc une nouvelle valeur d'essai de la diminution finale réelle de la teneur en eau du sol, DMAFT, qui est comparée avec la valeur d'essai précédente. Si elles sont proches, le bilan est complété, sinon, on répète l'opération. Celle-ci peut être effectuée jusqu'à cinq fois si nécessaire et, si l'on n'aboutit pas à des valeurs proches, on prend la moyenne des deux valeurs d'essai dont on dispose. La figure C-5 illustre la manière dont cette méthode fonctionne.

La première partie de la méthode est détaillée dans l'ordinogramme de la figure C-6. On part du principe que la variation de la diminution de la teneur en eau du sol est linéaire durant le mois. On déduit ensuite la fraction temporelle, TF, pour le mois, lorsque l'évapotranspiration effective de la culture est identique à l'évapotranspiration potentielle, ce qui est fait également pour les fractions initiale et finale de diminution, DF1 et DF2, correspondant à la fraction du mois où l'évapotranspiration effective de la culture est inférieure à l'évapotranspiration potentielle. On calcule alors

pour ce moment une fraction moyenne de diminution, DF, qui est une moyenne simple de DF1 et DF2.

On utilise alors la fraction de diminution, DF, pour évaluer une fraction d'évapotranspiration correspondante, ETF, qui est définie comme le rapport entre l'évapotranspiration réelle de la culture et l'évapotranspiration potentielle.

La figure C-7 montre quelle est la relation postulée entre DF et ETF. On suppose que cette relation varie uniquement en fonction du type de culture mais, en fait, il y aura également une variation dépendant du type de sol. Toutefois, on part du principe que, pour une vaste gamme de sols de texture intermédiaire, cette variation n'est pas significative par rapport aux autres approximations des évaluations.

La relation exposée dans la figure C-7 a été préparée pour trois cultures représentatives, principalement sur la base d'informations présentées par Burt et coll. (1981). Dans ce document, la fraction d'évapotranspiration de la culture a été rattachée à la tension d'humidité plutôt qu'à la fraction de diminution, et il a fallu passer par une étape intermédiaire pour déterminer la tension d'humidité à partir de la fraction de diminution en fonction du type de sol. Cette méthode est peut-être techniquement supérieure à celle qui est employée ici, mais la rareté des données régionales sur les catégories de texture de sol et les propriétés qui s'y rattachent paraissait justifier le recours à une méthode plus simple.

On a donc préparé une relation entre la tension d'humidité et la fraction de diminution pour un sol de texture intermédiaire sur la base d'informations tirées de trois sources (Burt et coll., 1981; Doorenbos et Pruitt, 1975; Ilaco, 1981), ainsi que le montre la figure C-8. Cette relation devrait adéquatement représenter, en ce qui concerne les objectifs de ce module, la gamme de sols à vocation essentiellement agricole où l'irrigation

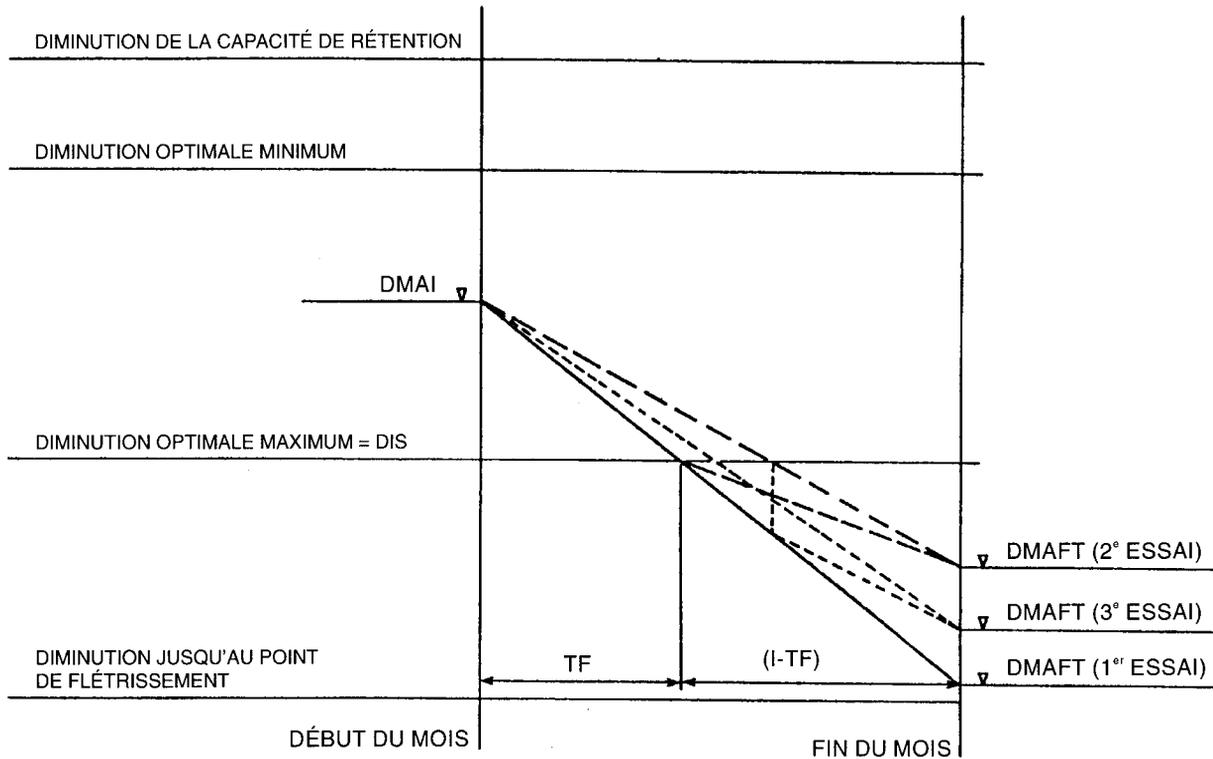


Figure C-5. Bilan hydrique réel.

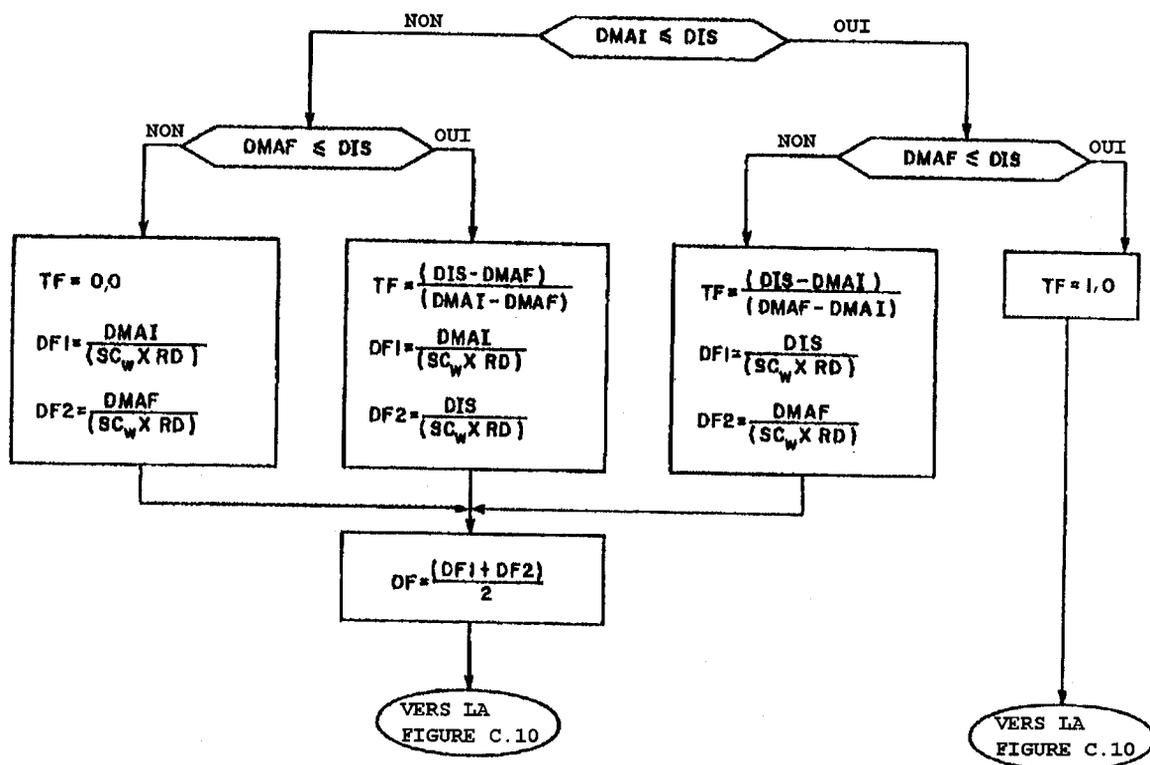


Figure C-6. Fractions temporelles et de diminution.

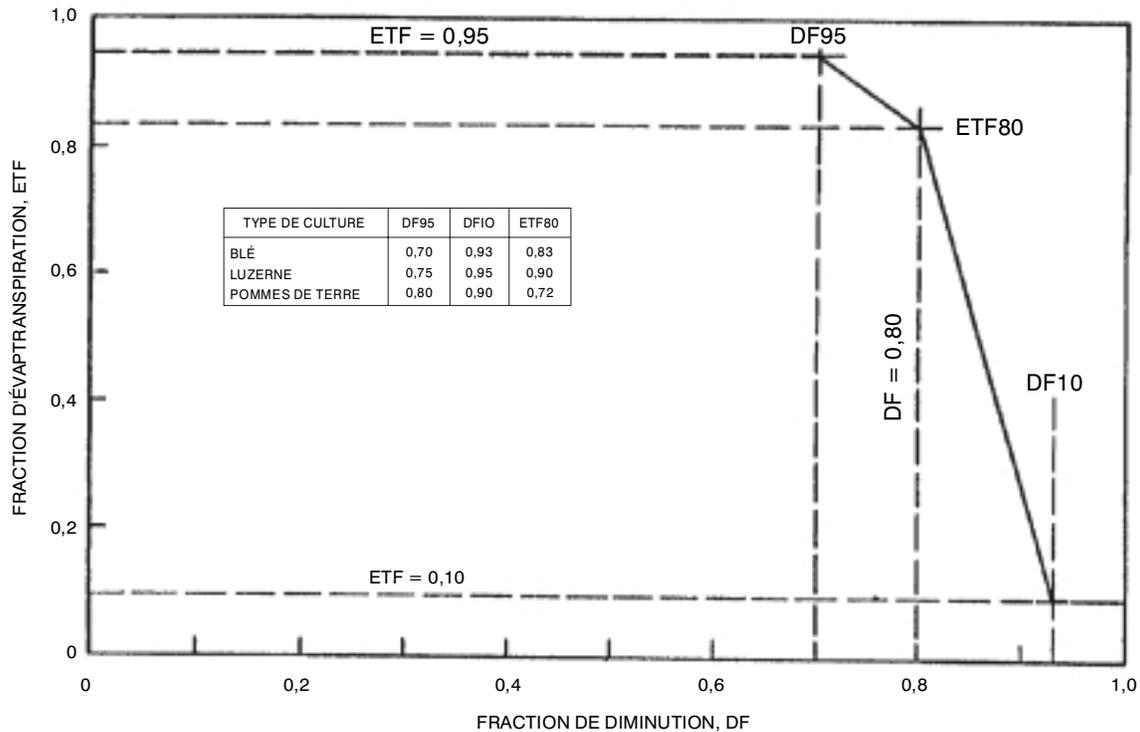


Figure C-7. Courbe de définition de la relation DF/ETF.

est pratiquée. La relation a ensuite été appliquée aux courbes de culture ETF par Burt et coll. (1981) afin d'aboutir aux relations DF/ETF de la figure C-7.

La relation DF/ETF est définie de façon spécifique pour chaque type de culture en précisant les paramètres de fractions de diminution et d'évapotranspiration DF95, DF10 et ETF80, ainsi que le montre la figure C-7 et tel qu'expliqué ci-après :

- DF95 : valeur de DF à ETF = 0,95
- DF10 : valeur de DF à ETF = 0,10
- ETF80 : valeur de ETF à DF = 0,80

Ces valeurs sont utilisées pour estimer ETF à partir de DF par interpolation linéaire entre les points définis, ainsi que l'expose l'ordinogramme de la figure C-9.

L'estimation de l'évapotranspiration mensuelle effective de la culture, ETA_c , qui en

résulte est alors obtenue par la formule suivante

$$ETA_c = [TF + (1 - TF) \times ETF] \times ETP_c \text{ (mm)}$$

alors que la nouvelle valeur d'essai de la diminution finale, DMAFT, devient

$$DMAFT = DMAI - RE - CMIA + ETA_c \text{ (mm)}$$

La valeur absolue de la différence entre DMAFT et DMAF, en tant que fraction de DMAF, est comparée avec une valeur acceptable fixée à 0,01. Si la valeur est dépassée et que l'on a répété l'opération moins de cinq fois, on attribue à DMAF une valeur égale à celle de DMAFT et l'on recommence l'opération. Si l'on a répété l'opération cinq fois sans obtenir des valeurs suffisamment convergentes, la diminution réelle de la teneur en eau du sol en fin de mois qui est acceptée, DMA, devient

$$DMA = (DMAFT + DMAF)/2$$

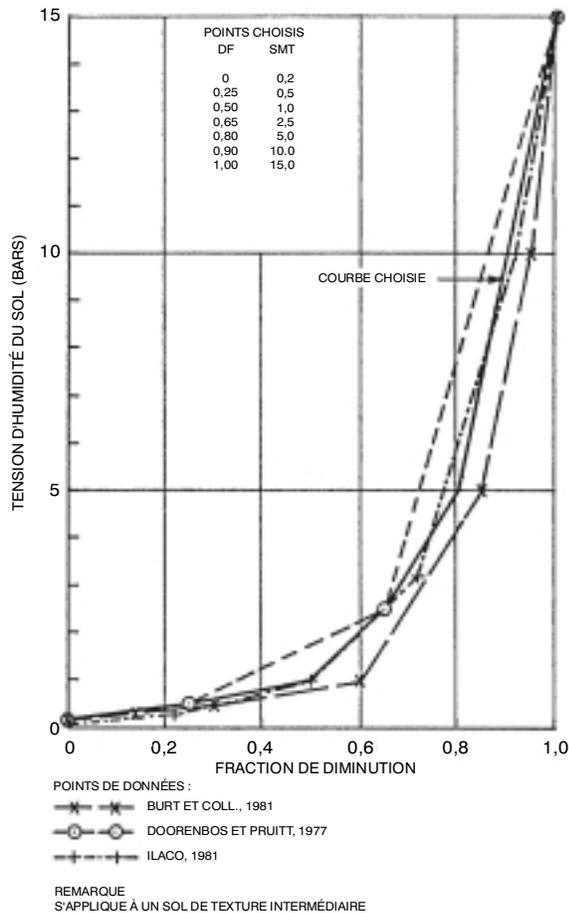


Figure C-8. Courbe de tension d'humidité du sol.

Si l'on obtient des valeurs suffisamment convergentes, la valeur de DMA est fixée à égalité avec celle de DMAFT.

C.4.6 Irrigation nécessaire au lessivage

Le lessivage mensuel nécessaire à la culture, LR_c , peut être réalisé en partie par la proportion de précipitations qui subit une percolation, RP , en partie par la proportion d'eau apportée pour irriguer les cultures qui connaît une percolation et en partie, si nécessaire, par une irrigation supplémentaire spécifiquement destinée à assurer un lessivage.

Dans des conditions optimales d'irrigation, la quantité mensuelle d'eau d'irrigation, $CMIO$, est pleinement utilisée à l'intérieur de la rhizosphère.

La quantité d'eau qui doit être amenée dans le champ pour réaliser cette réalimentation correspond à $CMIO/(EA_w/100)$ où EA_w est l'efficacité pondérée de l'irrigation. L'efficacité de l'absorption, EA , correspond à la portion de la quantité totale d'eau d'irrigation amenée dans le champ qui pénètre et demeure à l'intérieur de la rhizosphère pour contribuer à l'évapotranspiration. La proportion de cette eau qui subit une percolation correspond donc à $(CMIO/EA_w) \times EP_w$, où EP_w représente l'efficacité pondérée de la percolation.

L'irrigation mensuelle supplémentaire assurant un lessivage optimal, $LMIO$, devient donc

$$LMIO = LR_c - RP - (CMIO/EA_w) \times EP_w \text{ (mm)}$$

$LMIO$ étant fixée à zéro si le résultat est négatif.

On suppose qu'une irrigation sub-optimale des cultures débouche sur une irrigation sub-optimale de lessivage dans la même mesure. On utilise par conséquent le facteur d'ajustement du niveau d'irrigation, ILA , pour obtenir la valeur de l'irrigation mensuelle réelle de lessivage, $LMIA$, en procédant comme suit

$$LMIA = LMIO \times (ILA/100) \text{ (mm)}$$

Tout comme c'est le cas pour l'irrigation des cultures, le volume mensuel correspondant d'irrigation supplémentaire de lessivage, $LMIV$, est évalué au moyen de la formule

$$LMIV = LMIA \times AT \times (AP_c/100)/10^5 \text{ (Mm}^3\text{)}$$

C.4.7 Dérivations, pertes et écoulement restitué

Les principales valeurs tirées des évaluations précédentes sont celles de l'irrigation mensuelle réelle cumulée, $CMIA$ et $CMIV$, celles de l'irrigation mensuelle réelle supplémentaire de lessivage, $LMIA$ et $LMIV$, ainsi que celle de la diminution réelle de la teneur en eau du sol, DMA , pour la fin du mois. Cette dernière valeur

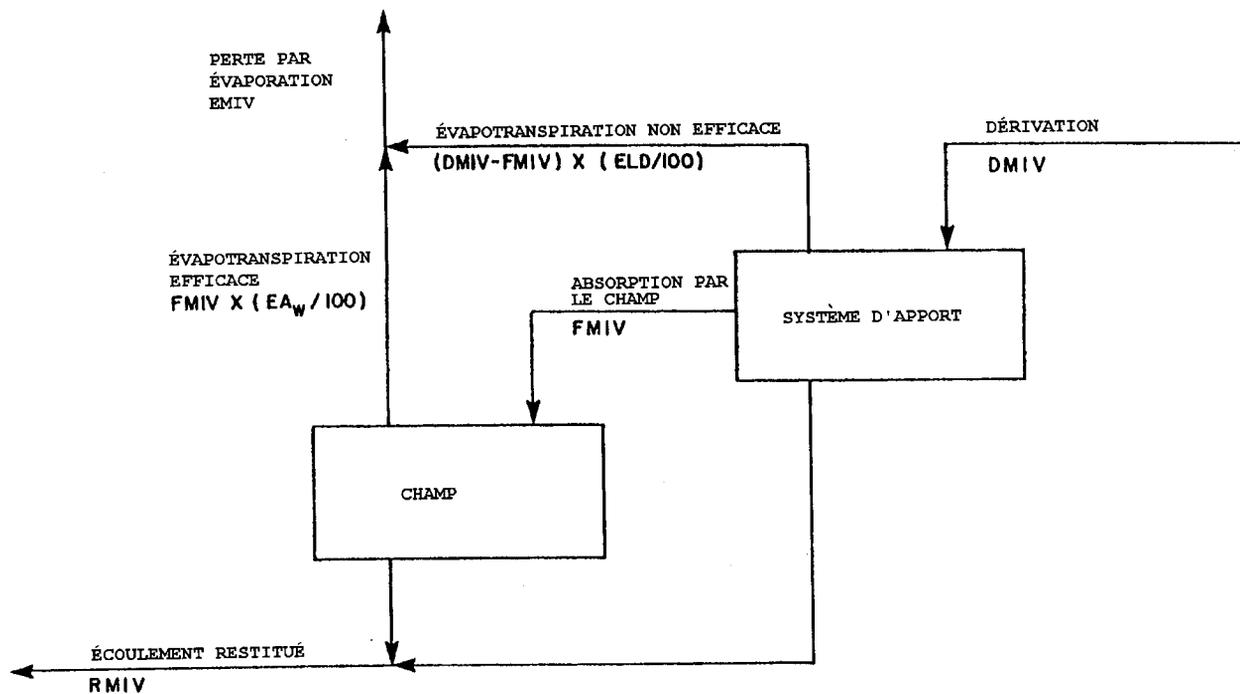


Figure C-9. Fraction d'évapotranspiration.

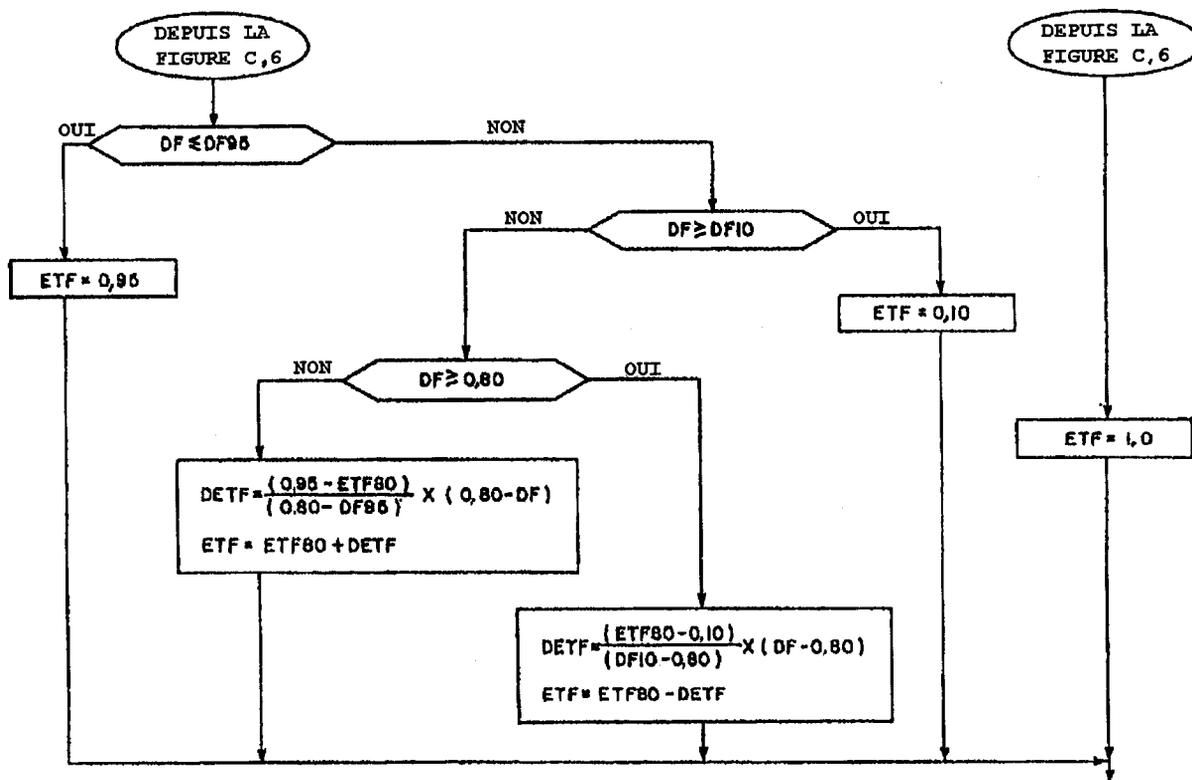


Figure C-10. Bilan des dérivation, des pertes et de l'écoulement restitué.

est convertie en fraction de diminution réelle de la teneur en eau du sol, DFAA, pour pouvoir servir à l'évaluation du mois suivant,

$$DFAA = DMA / (SC_w \times RD)$$

et, à la fin du dernier mois de la saison, la fraction finale réelle de la teneur en eau du sol, DFAF, est fixée à égalité avec DFAA.

L'apport d'eau dans le champ qui fournit la quantité nécessaire à l'irrigation de la rhizosphère de la culture est CMIV/(EA_w/100). De la même façon, l'apport d'eau dans le champ qui assure la percolation supplémentaire nécessaire au lessivage est LMIV/(EP_w/100). Par conséquent, la quantité mensuelle d'eau nécessaire à l'irrigation du champ, FMIV, est obtenue au moyen de la formule

$$FMIV = [CMIV / (EA_w / 100)] + [LMIV / (EP_w / 100)] \text{ (Mm}^3\text{)}$$

On obtient à partir de cette valeur la quantité mensuelle d'eau d'irrigation amenée par dérivation, DMIV, par l'intermédiaire de la valeur d'efficacité de l'apport, ED

$$DMIV = FMIV / (ED / 100) \text{ (Mm}^3\text{)}$$

L'efficacité de l'apport correspond au rapport entre l'apport d'eau d'irrigation dans le champ et la quantité totale d'eau dérivée et elle tient compte de toutes les pertes encourues par le système entre le cours d'eau et le champ.

Une certaine proportion de la quantité mensuelle d'eau d'irrigation amenée par dérivation, DMIV, est consommée par les cultures ou retenue par la rhizosphère alors qu'une autre partie s'évapore par les surfaces exposées des canaux, des drains, des réservoirs et des bassins d'infiltration. Le tout constitue la perte mensuelle d'eau d'irrigation attribuable à l'évaporation ou à la consommation, EMIV.

La perte due à la consommation dans le champ est déterminée par la formule FMIV ×

(EA_w/100). Les pertes dues à l'évaporation à l'intérieur du système d'apport sont définies comme un pourcentage de la perte par évaporation en cours d'apport, ELD, par rapport au total des pertes encourues à l'intérieur du système, (DMIV - FMIV). Par conséquent, la perte globale par évaporation (ou consommation), EMIV, s'établit comme suit

$$EMIV = FMIV \times (EA_w / 100) + (DMIV - FMIV) \times (ELD / 100) \text{ (Mm}^3\text{)}$$

L'écoulement mensuel d'eau d'irrigation provenant de la dérivation qui est restitué, RMIV, se calcule donc ainsi

$$RMIV = DMIV - EMIV \text{ (Mm}^3\text{)}$$

Cet écoulement restitué tient donc compte aussi bien du ruissellement que de la percolation dans la dérivation au niveau du champ comme à celui du système d'apport. Du point de vue du calcul du bilan hydrologique régional, on estime que cela est adéquat. Les valeurs d'écoulement restitué peuvent ne pas coïncider avec les valeurs de ruissellement enregistrées dans les canaux de décharge de la zone d'irrigation puisque les relevés effectués ne tiennent pas compte d'une percolation qui peut être substantielle. D'un autre côté, les relevés de ruissellement de drainage couvrent le ruissellement des précipitations, si ce phénomène s'est produit, ce qui n'est pas le cas de l'écoulement restitué qui a été calculé pour l'eau de dérivation.

La figure C-10 représente de façon schématique l'équilibre créé entre dérivation, pertes et écoulement restitué pour une zone d'irrigation. Les valeurs mensuelles de dérivation d'irrigation et d'écoulement restitué alimentent le modèle du module 7B au fichier 24.

RÉFÉRENCES

Acres International Limited. 1984. Water supply constraints to energy development. Phase III. Summary report. Document non publié préparé pour la Direction générale des eaux intérieures, Environnement Canada, Ottawa.

- Ayers, R.S. et D.W. Westcot. 1976. Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome.
- Burt, J.E., J.T. Hayes, P.A. O'Rourke, W.H. Terjung et P.E. Todhunter. 1981. A parametric crop water use model. Water Resour. Res. 17(4): 1095-1108.
- Doorenbos, J. et A.H. Kassam. 1979. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper 33, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome.
- Doorenbos, J. et W.O. Pruitt. 1975. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome.
- Hobbs, E.H. et K.K. Krogman. 1971. Overwinter precipitation storage in irrigated and nonirrigated chin loam soil. Can. J. Soil Sci. 51: 13-18.
- Ilaco, B.V. 1981. Agricultural compendium for rural development in the tropics and subtropics. Ministère de l'Agriculture et des Pêches, Pays-Bas.
- Pohjakas, K. 1981. Evaluation of center pivot irrigation practices in Alberta. 1981 Pacific Northwest Regional Meeting, Société canadienne de génie rural.
- U.S. Department of Agriculture. 1967. Irrigation water requirements. Technical Release No. 21. Soil Conservation Service, Engineering Division.

Symboles

AP_c	Pourcentage de la superficie totale irriguée par type de culture	DFAF	teneur en eau du sol Fraction finale de diminution réelle de la teneur en eau du sol
AP_i	Pourcentage de la zone totale irriguée par type de système d'irrigation	DFAI	Fraction initiale de diminution réelle de la teneur en eau du sol
AP_{ih}	Pourcentage du total de la zone recevant une forte fréquence d'irrigation	DFB	Constante d'évaluation de DFO_{max}
AP_{il}	Pourcentage du total de la zone recevant une faible fréquence d'irrigation	DFO_{max}	Fraction maximum de diminution optimale de la teneur en eau du sol
AP_s	Pourcentage du total de la zone irriguée par type de sol	DFO_{min}	Fraction minimum de diminution optimale de la teneur en eau du sol
AT	Superficie irriguée totale	DFOA	Facteur d'ajustement mensuel de DFO_{max}
CF	Facteur de culture	DIA	Profondeur réelle d'irrigation
CMIA	Irrigation mensuelle réelle cumulée	DIO	Profondeur optimale d'irrigation
CMIO	Irrigation mensuelle optimale cumulée	DIS	Profondeur type d'irrigation
CMIV	Irrigation volumétrique mensuelle	DMA	Diminution réelle de la teneur en eau du sol
DAF	Facteur de profondeur d'absorption	DMAF	Diminution finale réelle de la teneur en eau du sol
DETF	Augmentation de ETF	DMAFT	Valeur d'essai de DMAF
DF	Fraction de diminution (moyenne de DF1 et DF2)	DMAI	Diminution initiale réelle de la teneur en eau du sol
DF1	Fraction initiale de la diminution pour laquelle ETA_c est inférieur à ETP_c	DMIV	Quantité mensuelle d'eau d'irrigation amenée par dérivation
DF2	Fraction de la diminution finale pour laquelle ETA_c est inférieur à ETP_c	DMOF	Diminution finale optimale de la teneur en eau du sol
DF10	Valeur de DF à $ETF = 0,10$	DMOI	Diminution initiale optimale de la teneur en eau du sol
DF95	Valeur de DF à $ETF = 0,95$	EA	Efficacité de l'absorption
DFA	Constante d'évaluation de DFO_{max}	EA_w	Efficacité pondérée de l'absorption
DFAA	Fraction de diminution réelle de la		

EAPTO	Efficacité de l'absorption de la hauteur totale des précipitations hors de saison	ETF80	Valeur de ETF à DF = 0,80
EAR	Efficacité de l'absorption des précipitations durant la saison (choisie)	ETP _c	ET potentielle de la culture
EARA	Efficacité réelle de l'absorption des précipitations	ETP _r	ET potentielle de référence
		FMIV	Quantité mensuelle d'eau nécessaire à l'irrigation du champ
		ILA	Ajustement du niveau d'irrigation
ECEA	Facteur d'ajustement de la salinité du sol	ILC	Niveau d'irrigation de la culture
ECEN	Salinité tolérable du sol pour un rendement potentiel des cultures de 90 %	ILCA	Ajustement du niveau d'irrigation en fonction du type de système d'irrigation
ECEN _{max}	Salinité maximum du sol pour un rendement potentiel des cultures de 90 %	ILCA _w	Ajustement pondéré du niveau d'irrigation en fonction du type de système d'irrigation
ECEZ	Salinité tolérable du sol pour un rendement potentiel des cultures de 0 %	LMIA	Irrigation mensuelle réelle de lessivage
ECEZ _{max}	Salinité maximum du sol pour un rendement potentiel des cultures de 0 %	LMIO	Irrigation mensuelle assurant un lessivage optimal
ECW	Salinité de l'eau d'irrigation	LMIV	Volume mensuel d'irrigation supplémentaire de lessivage
ED	Efficacité de l'apport	LR _c	Lessivage nécessaire à la culture
EL	Efficacité du lessivage	LRF	Fraction pondérée de la moyenne de lessivage nécessaire
EL _w	Efficacité pondérée du lessivage	LRFN	Fraction de lessivage nécessaire pour une faible fréquence d'irrigation
ELD	Perte due à l'évaporation lors du transport	LRFZ	Fraction de lessivage nécessaire pour une forte fréquence d'irrigation
EMIV	Perte mensuelle d'eau d'irrigation attribuable à l'évaporation	NDM	Nombre de jours dans le mois
EP	Efficacité de la percolation	P	Précipitations
EP _w	Efficacité pondérée de la percolation	PTO	Total des précipitations hors de saison
ETA _c	ET réelle des cultures	PTOE	Précipitations efficaces hors de saison
ETF	Fraction d'évapotranspiration (ETA _c /ETP _c)	RD	Profondeur de la rhizosphère
		c	
		X	Variable indépendante
		Y	Variable dépendante