PolyPublie
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

| | |
|---|---|
| **Titre:** Title: | Exploitation d'un réservoir à buts multiples en périodes de pénurie |
| **Auteur:** Author: | Hamidou Mamadou Abdou |
| **Date:** | 1996 |
| **Type:** | Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis |
| **Référence:** Citation: | Mamadou Abdou, H. (1996). Exploitation d'un réservoir à buts multiples en périodes de pénurie [Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/8965/ |

**Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

| | |
|---|---|
| **URL de PolyPublie:** PolyPublie URL: | https://publications.polymtl.ca/8965/ |
| **Directeurs de recherche:** Advisors: | Guy Leclerc |
| **Programme:** Program: | Non spécifié |

**Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal**
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal

https://publications.polymtl.ca

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

# EXPLOITATION D'UN RÉSERVOIR À BUTS MULTIPLES EN PÉRIODES DE PÉNURIE

HAMIDOU MAMADOU ABDOU

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIAE DOCTOR (Ph.D.)

(GÉNIE CIVIL)

JUIN 1996

© Hamidou Mamadou Abdou, 1996.

National Library of Canada
Acquisitions and Bibliographic Services
395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale du Canada
Acquisitions et services bibliographiques
395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

*Your file Votre référence*

*Our file Notre référence*

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-26426-2

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse est intitulée:

# EXPLOITATION D'UN RÉSERVOIR À BUTS MULTIPLES EN PÉRIODES DE PÉNURIE

présentée par: MAMADOU ABDOU Hamidou

en vue de l'obtention du diplôme de: Philosophiae Doctor

a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de:

M. MARCHE Claude, D.Sc.A, président

M. LECLERC Guy, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. KAHAWITA René, Ph.D., membre

M. TREMBLAY Michel, Ph.D., membre

*Au Niger, mon pays*

*À tous mes compatriotes qui n'ont pas eu la chance d'atteindre ce niveau du savoir et qui m'ont donné les moyens de l'acquérir*

## Remerciements

Je tiens à remercier et à témoigner un profond respect à mon directeur, le Professeur Guy Leclerc, dont l'appui technique, les conseils judicieux et le sens de la rigueur m'ont aidé à l'accomplissement de cette thèse.

Mes remerciements vont aussi à l'endroit des personnes et institutions dont la contribution a aidé dans cette réalisation:

- le Programme Canadien de Bourses de la Francophonie, dont le soutien financier, sur cinq ans, a accompagné mes études;
- Madame Micheline Roberge, Conseillère du PCBF, dont la présence constante et la bienveillance ont facilité le suivi et la réalisation de nos travaux;
- le Centre Sahel, dont la subvention a contribué à la réalisation de l'étape complémentaire du projet de recherche au Niger;
- Monsieur Belko Garba, Haut Commissaire au Barrage de Kandadji, pour avoir facilité et rendu agréables nos séjours de recherche au Niger;
- Monsieur Gaston Patenaude, Technicien au Laboratoire d'Hydrodynamique, dont la disponibilité et l'aisance sur AutoCad ont porté la marque dans cette thèse.

Je remercie très particulièrement mon épouse Bibata, mes enfants Laila, Abdelnasser et Noureddine, de même que mes parents, dont la patience et les encouragements m'ont beaucoup motivé dans l'accomplissement de cette thèse.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les collègues de travail et amis dont j'ai grandement apprécié la compagnie durant toutes ces années à l'École Polytechnique, en particulier Job Ikama, dont la présence constante a constitué un soutien très apprécié.

Finalement, j'adresse un témoignage spécial de remerciement au Professeur Claude Marche qui a beaucoup aidé à l'organisation de ma soutenance.

## Résumé

Cette recherche a pour objet l'exploitation d'un système hydrique à fins multiples, l'accent étant donné à l'allocation de l'eau en périodes de faible hydraulicité entre les utilisateurs, question d'intérêt vital dans les régions climatiques tels que les pays du Sahel, où les patrons de précipitation engendrent des sécheresses chroniques.

Le travail a porté sur trois sujets particuliers:

1) modélisation de l'opération du système par un réseau de noeuds et d'arcs de capacité limitée,
2) mise en oeuvre de cette approche réseau au cas projeté d'un système hydrique à fins multiples en région sahélienne et
3) évaluation de la faisabilité du projet proposé en regard d'un développement durable du territoire.

La formulation réseau vise la gestion optimale des déficits et surplus exprimés par rapport aux demandes en eau des utilisateurs et devient une alternative aux formulations classiques dont la fonction économique maximise les revenus nets de l'exploitation du système. Un formalisme, construit autour d'une typologie d'arcs et de noeuds, est proposé pour faciliter la modélisation (éléments structurels, variables d'état et de contrôle) de l'exploitation d'un système hydrique. Dans ce travail, la résolution d'un problème est effectuée par l'algorithme ''out-of-kilter'' (OKA). L'exploitation du

système hydrique projeté à Kandadji (Niger), système à fins multiples située sur le fleuve Niger, sert de plate-forme de validation du modèle réseau et d'exemple de sa mise en oeuvre. Les coefficients de pénalité appliqués aux déficits et aux surplus d'eau s'avèrent déterminants à l'allocation des déficits et surplus entre les utilisateurs. Le choix de la valeur de ces coefficients est discuté et illustré comme l'est le comportement du système exploité sous divers scénarios d'apports naturels.

L'exploitation de la variante proposée à Kandadji pour les 14 années d'observations des apports naturels montre qu'en saison sèche, la production d'énergie demeure toujours très petite sans être conflictuelle à la satisfaction des demandes en eau à l'aval de la centrale hydroélectrique. La satisfaction de la demande hydroélectrique en saison humide et des demandes en eau d'irrigation autant en saison humide qu'en saison sèche, et ce avec une fiabilité élevée, indique que la puissance installée et la superficie totale des périmètres irrigués proposées pour le projet de Kandadji sont compatibles avec le développement durable de ce territoire.

Mots-clés: exploitation système hydrique, algorithme ''out-of-kilter'', modèle réseau, développement durable

## Abstract

This research is devoted to the management and operation of multi-purpose water resource systems, in particular, with the strategy of water allocations between competing users that should be implemented during periods of low flows. This is a vital area of concern in climatological regions such as those located in the Sahel belt, where rainfall patterns produce recurrent droughts. The research effort has centered around three particular topics:

1- modeling of the system operation with a network of nodes and arcs of limited capacity;

2- application of this network approach to a planned multi-purpose water system located in a Sahelian region; and

3- assessment of the proposed project with respect to sustainable development of the project area.

The network formulation has as its objective the optimal management of water deficits and surpluses measured relative to the water demands of competing users. This is in contrast to the classical formulations whose objective functions maximize the net income of the system operation. A formalism built around a classification of the arc and node types, is proposed as an aid to modeling the operation (structural components and state and control variables) of the water system. In this research, the "out-of-kilter" (OKA) algorithm was selected.

Operation of the proposed multi-purpose water resources system at Kandadji (Niger) on the Niger River is the case study used to validate the network approach and to illustrate its application. Penalty coefficients applied to the water deficits and surpluses governs their distribution among the users. The selection of their numerical values is discussed and explained as is the behavior of the system operated under various scenarios of natural inflows.

Operation of the proposed Kandadji project for the 14 years of observed natural inflows shows that during the dry season, the power production although very small does not conflict with the water demands downstream of the powerhouse. During the wet season, the water demands for power production are easily met, while during all seasons, water demands for irrigation are satisfied with a high reliability, indicating that the installed power capacity and the total irrigated farm area of the proposed Kandadji project are compatible with sustainable development of this territory.

Key-words : Water resource system operation, "out-of-kilter" algorithm, network model, sustainable development

# Table des matières

**Dédicace**.....iv

**Remerciements**.....v

**Résumé**.....vii

**Abstract**.....ix

**Table des matières**.....xi

**Liste des tableaux**.....xvi

**Liste des figures**.....xix

**Liste des symboles**.....xxii

**Liste des sigles et abréviations**.....xxiv

**Liste des annexes**.....xxv

**CHAPITRE I: LA MISE EN VALEUR DE L'EAU ET L'EXPLOITATION D'UN SYSTÈME HYDRIQUE**.....1

1.1 Informations générales de base et stratégies d'exploitation.....2

1.2 Thème de cette recherche doctorale.....6

1.3 Impacts des déficits.....9

1.4 But du projet.....12

1.5 Plan de la thèse.....13

**CHAPITRE II: LA THÉORIE DES RÉSEAUX APPLIQUÉE AUX SYSTÈMES HYDRIQUES**.....16

2.1 Définitions préalables.....16

2.2 Le problème du flot au coût minimal....22

2.3 L'algorithme ''out-of-kilter''(OKA)....23

2.3.1 Conditions d'optimalité....23

2.3.2 Description de l'algorithme de résolution....27

2.4 Revue de littérature d'application OKA....37

2.4.1 Étude du système de la rivière Trent (Sigvaldason, 1976)....38

2.4.2 Simulation de l'aqueduc de Californie (Chung et al, 1989)....40

2.4.3 Étude du système d'approvisionnement de la ville de Boulder au Colorado (Brendecke et al, 1989)....42

2.4.4 Étude du complexe Oroville (Sabet et Creel, 1991)....45

2.4.5 Synthèse des cas d'application....47

**CHAPITRE III: MODÉLISATION RÉSEAU DU SYSTÈME HYDRIQUE DE KANDADJI POUR FIN D'EXPLOITATION**....50

3.1 La description du système et des utilisations de l'eau....50

3.2 Modélisation réseau de l'exploitation d'un système hydrique....57

3.2.1 Types de noeuds....58

3.2.2 Types d'arc....58

3.2.3 Représentation réseau d'un système hydrique....61

3.3 Modélisation réseau de l'exploitation du système Kandadji....66

3.3.1 Le réseau du système de Kandadji....67

3.3.2 La fonction économique....75

3.4 Le modèle KANDOKA....78

3.4.1 La procédure NETFLOW....78
3.4.2 Le générateur du réseau....79
3.4.3 Images de cartes....80
3.4.4 Application sur une période....82
3.4.5 Application sur plusieurs périodes....83
3.5 Conclusion....84
**CHAPITRE IV: QUELQUES ÉTUDES RÉALISÉES AVEC KANDOKA..85**
4.1 Introduction....85
4.2 Scénario de base....86
4.2.1 Les apports au réservoir....87
4.2.2 Les pertes par évaporation....88
4.2.3 La demande en énergie....88
4.2.4 Demande de la ville de Niamey....88
4.2.5 Demande en eau d'irrigation....88
4.2.6 Le débit réservé....90
4.2.7 L'état du réservoir....90
4.2.8 Les apports des affluents intermédiaires....90
4.3 Étude du comportement du système sous l'influence de divers types de fonctions de pénalité sur les déficits....91
4.3.1 Établissement des coefficients de pénalité sur les déficits....91
4.3.2 Influence du vecteur C1....93
4.3.3 Influence du vecteur C2....96

4.3.4 Influence du vecteur C3....97
4.3.5 Conclusion....98
4.4 Influence d'apports faibles sur les niveaux de production....101
4.4.1 Cas sous le vecteur C1....101
4.4.2 Cas sous le vecteur C2....104
4.4.3 Cas sous le vecteur C3....105
4.4.4 Conclusion....105
4.5 Étude des compromis entre la garantie du débit réservé et les autres objectifs du système....106
4.5.1 Conditions d'apports moyens....107
4.5.2 Conditions d'apports faibles....111
4.5.3 Conclusion....113
4.6 Étude de l'influence d'une réduction de l'emmagasinement initial....114
4.7 Influence du retrait de la contrainte sur l'emmagasinement cible....116
4.7.1 Cas sous le vecteur C1....116
4.7.2 Cas sous le vecteur C2....118
4.7.3 Cas sous le vecteur C3....118
4.7.4 Conclusion....119
4.8 Conclusion....120
**CHAPITRE V: EXPLOITATION D'UN SYSTÈME HYDRIQUE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE....123**
5.1 Données d'entrée aux simulations annuelles....123

5.2 Exemple de résultats....126

5.3 Synthèse des résultats simulés pour les 14 années d'observation des apports naturels....129

5.3.1 Satisfaction de la demande énergétique....130

5.3.2 Satisfaction de la demande agricole....134

5.3.3 État de l'emmagasinement du réservoir et des autres demandes du système....135

5.4 Conclusion....137

**CHAPITRE VI: CONCLUSION**....139

6.1 Contributions principales de la recherche....139

6.1.1 Résultats de l'analyse théorique....141

6.1.2 Application au système hydrique proposé à Kandadji....143

6.1.3 Comparaison des vecteurs de pénalité....145

6.1.4 Faisabilité du système proposé en environnement durable....146

6.2 Perspectives de travail futur....147

6.3 Conclusion générale....149

**Références**....150

**Annexes**....156

## Liste des tableaux


Tableau 1.1 Facteur-réponse de productivité du paddy....12

Tableau 2.1 États de conformité d'un arc....27

Tableau 2.2 Modifications de flot possibles sur un arc....32

Tableau 2.3 États possibles d'un arc (i,j) avec $i \in N_1$ et $j \in N_2$ ....34

Tableau 2.4 États possibles d'un arc (i,j) avec $i \in N_2$ et $j \in N_1$ ....35

Tableau 2.5 Modification $\Delta\Pi$ pour ramener $(i_0,j_0)$ à l'état conforme....36

Tableau 3.1 Caractéristiques du réservoir....52

Tableau 3.2 Surface et volume de la retenue....52

Tableau 3.3 Caractéristiques de la centrale hydroélectrique....53

Tableau 3.4 Périmètres irrigués....53

Tableau 3.5 Définition des arcs du bief A....70

Tableau 3.6 Définition des arcs du bief B....71

Tableau 3.7 Définition des arcs du bief C....71

Tableau 3.8 Définition des arcs du bief D....72

Tableau 3.9 Définition des arcs du bief E....72

Tableau 3.10 Contraintes de flot dans les arcs....77

Tableau 3.11 Exemple de représentation d'un arc d'apport....81

Tableau 3.12 Exemple de représentation d'un arc de demande cible....81

Tableau 3.13 Exemple de représentation d'un arc de surplus....81

Tableau 3.14 Exemple de représentation d'un arc de déficit.....81

Tableau 3.15 Exemple de représentation d'un arc de l'allocation effective.....81

Tableau 3.16 Exemple de représentation d'un arc transteur.....82

Tableau 3.17 Exemple de représentation d'un arc transiteur muni d'une contrainte.....82

Tableau 3.18 Exemple de représentation d'un arc particulier.....82

Tableau 3.19 Autre exemple de représentation d'un arc particulier.....82

Tableau 3.20 Représentation de l'arc de l'emmagasinement et de celui du débit transféré au Nigéria sur une période.....82

Tableau 4.1 Vecteur C1 de coefficients de pénalité sur les déficits.....92

Tableau 4.2 Vecteur C2 de coefficients de pénalité sur les déficits.....92

Tableau 4.3 Vecteur C3 de coefficients de pénalité sur les déficits.....92

Tableau 4.4 Perte de productivité agricole avec QR60 en année moyenne.....110

Tableau 4.5 Perte de productivité agricole avec QR30 en année sèche.....111

Tableau 4.6 Perte de productivité agricole avec QR60 en année sèche.....113

Tableau 4.7 Influence de la diminution de l'emmagasinement initial sur les niveaux de production.....115

Tableau 5.1 Module annuel et indice d'hydraulicité du fleuve Niger à Kandadji.....124

Tableau 5.2 Vecteur C1 étendu à l'année.....125

Tableau 5.3 Hauteur de chute moyenne pour l'hydroélectricité.....126

Tableau 5.4 Production agricole de saison sèche à l'année 8.....128

Tableau 5.5 Production agricole de saison humide à l'année 8.....128

Tableau 5.6 Production agricole du périmètre A en pourcentage de la production maximale.....134

## Liste des figures


Figure 2.1 Transformation d'un réseau avec noeuds-sources et noeuds-puits en un réseau de circulation....21

Figure 2.2 Schéma de l'algorithme OKA....29

Figure 3.1 Configuration du système hydrique de Kandadji....51

Figure 3.2 Apports hebdomadaires des années 1978 à 1994 à Kandadji....56

Figure 3.3 Réseau planaire du système hydrique de Kandadji....73

Figure 3.4 Réseau multipériodique de Kandadji....74

Figure 4.1 Apports caractéristiques observés à Kandadji....87

Figure 4.2 Évolution des prélèvements et de l'emmagasinement du réservoir en année moyenne selon les vecteurs C1, C2 et C3....93

Figure 4.3 Évolution de la production d'énergie en année moyenne selon les vecteurs C1, C2 et C3....95

Figure 4.4 Perte agricole versus production d'énergie en année moyenne selon les vecteurs C1, C2 et C3....97

Figure 4.5 Évolution des prélèvements et de l'emmagasinement du réservoir en année sèche selon les vecteurs C1, C2 et C3....102

Figure 4.6 Évolution de la production d'énergie en année sèche selon les vecteurs C1, C2 et C3....103

Figure 4.7 Perte agricole versus production d'énergie en année sèche selon les vecteurs C1, C2 et C3....104

Figure 4.8 Perte agricole versus production d'énergie en année moyenne selon le débit réservé....107

Figure 4.9 Évolution des prélèvements et de l'emmagasinement dans QR10 et QR30....108

Figure 4.10 Évolution de la production d'énergie en année moyenne selon le débit réservé....109

Figure 4.11 Évolution de la satisfaction de la demande en eau de Niamey en année moyenne sous QR60....110

Figure 4.12 Évolution de la production d'énergie en année sèche selon le débit réservé sous le vecteur C1....111

Figure 4.13 Perte agricole versus production énergétique en année sèche selon le débit réservé sous le vecteur C1....112

Figure 4.14 Évolution de la satisfaction de la demande en eau de Niamey en année sèche sous QR60....113

Figure 4.15 Évolution des prélèvements et de l'emmagasinement avec et sans contrainte sur l'emmagasinement cible sous le vecteur C1....117

Figure 4.16 Évolution de la production d'énergie avec et sans contrainte sur l'emmagasinement cible sous le vecteur C1....117

Figure 4.17 Évolution des prélèvements et de l'emmagasinement avec et sans contrainte sur l'emmagasinement cible sous le vecteur C3....119

Figure 4.18 Évolution de la production d'énergie avec et sans contrainte sur l'emmagasinement cible sous le vecteur C3.....120

Figure 5.1 Évolution des prélèvements et de l'emmagasinement à l'année 8.....127

Figure 5.2 Évolution de la production d'énergie à l'année 8.....127

Figure 5.3 Évolution de la production annuelle d'énergie.....130

Figure 5.4 Évolution de la production d'énergie en saison humide.....131

Figure 5.5 Évolution de la production d'énergie en saison sèche.....131

Figure 5.6 Évolution des prélèvements et de l'emmagasinement à l'année 7.....133

Figure 5.7 Évolution des prélèvements et de l'emmagasinement à l'année 8.....133

Figure 5.8 Emmagasinement le plus bas atteint et la semaine correspondante.....136

## Liste des symboles

$C_{ijt}$ : pénalité associée au surplus dans l'arc (i,j) à la période t

$Cd_{ijt}$ : pénalité associée au déficit sur l'arc (i,j) à la période t

$Co_{ijt}$ : pénalité associée à la violation d'une disposition opérationnelle dans l'arc (i,j) à la période t

$c_{ij}$ : coût unitaire du flot dans l'arc (i,j)

$DÉFICIT_{ijt}$ : déficit sur l'arc (i,j) à la période t

$DISPO_{ijt}$ : violation d'une disposition opérationnelle dans l'arc (i,j) à la période t

$d_{ij}$ : coût réduit par rapport aux potentiels $\Pi i$ et $\Pi j$

$ET_a$ : évapotranspiration actuelle

$ET_m$ : évapotranspiration maximale

i, j : identificateurs de noeuds

(i,j) : arc reliant le noeud i au noeud j

$i^*$ : marquage du noeud i

$K_y$ : facteur-réponse de productivité

$l_{ij}$ : flot minimal sur l'arc (i,j)

N : ensemble des noeuds du réseau

n : nombre de noeuds dans le réseau

$N_1$ : ensemble des noeuds non marqués

$N_2$ : ensemble des noeuds marqués

$q_{ij}$ : flot dans l'arc (i,j)

| | |
|---|---|
| R | : nombre de stades de croissance |
| r | : indice du stade de croissance |
| $SURPLUS_{ijt}$ | : surplus dans l'arc (i,j) à la période t |
| $S_0$ | : emmagasinement initial du réservoir |
| T | : nombre de périodes de l'horizon d'exploitation |
| t | : indice de la période d'exploitation |
| $u_{ij}$ | : capacité de l'arc (i,j) |
| $Y_a$ | : productivité actuelle de la plante |
| $Y_m$ | : productivité maximale de la plante |
| Z | : fonction économique |
| $\Delta q$ | : modification du flot pour rendre un arc conforme |
| $\Delta\Pi$ | : augmentation minimale des potentiels nodaux |
| $\alpha, \alpha_1, \alpha_2,$ | |
| $\beta, \beta_1, \beta_2,$ | |
| $\rho, \rho_1, \rho_2$ | : états de conformité et de non conformité d'un arc |
| $\delta_{ij}$ | : variable duale associée à la contrainte de flot maximal |
| $\omega_{ij}$ | : variable duale associée à la contrainte de flot minimal |
| $\Pi_i, \Pi_j$ | : potentiels nodaux en i et j |

## Liste des sigles et abréviations

CDWR : California Department of Water Resources

CVP : Federal Central Valley Project

C1, C2, C3 : vecteurs de coefficients de pénalité sur les déficits

dép* : dépassement du débit réservé

Emmag./C1 : évolution de l'emmagasinement du réservoir sous le vecteur C1

Énergie/C1 : évolution de la production d'énergie sous le vecteur C1

MUSIC : Multi-User System for Interactive Computing

MVS : Multiple Virtual System

OKA : Out-of-kilter Algorithm

Prélèv./C1 : évolution des prélèvements du réservoir sous le vecteur C1

QR10, QR30, QR60 : scénarios d'exploitation avec un débit réservé de 10, 30 et 60 $m^3/s$

SAS/OR : SAS Operation Research Software

SCE : South California Edison

SWP : California State Water Project

TCE : théorème de la complémentarité des écarts

## Liste des annexes

**Annexe A** ..... 156

Format des données d'entrée au modèle KANDOKA et des fichiers de résultats

**Annexe B** ..... 160

. Plan de situation géographique du système hydrique de Kandadji sur le fleuve Niger

. Résumé des principales caractéristiques de l'aménagement de Kandadji

# CHAPITRE I: LA MISE EN VALEUR DE L'EAU ET L'EXPLOITATION D'UN SYSTÈME HYDRIQUE

Qu'est-ce qu'exploiter un système hydrique? Sujet très vaste qui a suscité depuis longtemps des réflexions et la mise au point de nombreuses façons de faire, de nombreuses procédures adaptées au contexte de chaque système, et depuis une trentaine d'années à de nombreuses études et recherches faisant appel à des outils d'optimisation et de simulation, aux concepts de l'analyse des systèmes, etc. Un système hydrique, dans son sens large et général, est l'ensemble des équipements, des procédures, des politiques et règlements assemblés pour mettre en valeur l'eau disponible sur un territoire. L'exploitation d'un tel système se fonde entre autres sur

1. les objectifs définis lors de sa réalisation ou adoptés pour l'horizon décisionnel en cours,
2. les grandeurs des demandes qu'il est souhaitable ou exigé de satisfaire,
3. les contraintes amenées par les contextes socio-économiques et climatiques, et celles associées aux caractéristiques de l'aménagement et de ses équipements.

Les exploitants de systèmes hydriques particuliers ont développé des façons d'opérer leur système compte tenu de ses caractéristiques et de son comportement global. Depuis une quarantaine d'années, comme les systèmes hydriques deviennent plus

complexes et soumis à des sollicitations toujours plus grandes et diversifiées, et comme la capacité de calcul s'est accrue exponentiellement durant cette période, l'exploitation des systèmes hydriques est abordée par des outils nouveaux et des techniques décisionnelles rénovées. La littérature technique des quarante dernières années est riche d'un grand nombre de formulations du problème d'exploitation par des techniques numériques très diverses; cette littérature est aussi riche d'un grand nombre d'exemples, chacun avec ses propres particularités d'application de ces techniques d'optimisation, de simulation et d'analyse de décision. Yeh (1985) et Wurbs (1993) présentent une revue exhaustive des modèles appliqués aux réservoirs en mettant l'accent sur les différentes techniques d'optimisation.

L'exploitation d'un système hydrique se développe autour des décisions que le gestionnaire prend à chaque période décisionnelle en regard des quantités d'eau allouée à chaque utilisateur de la ressource compte tenu de l'état du système au moment où il prend sa décision.

## 1.1 Informations générales de base et stratégies d'exploitation

La décision d'allouer des quantités d'eau entre les utilisateurs se fonde sur plusieurs informations que nous regroupons ainsi:

1. informations descriptives de la disponibilité de l'eau et de l'évolution des apports naturels,
2. informations descriptives des besoins à rencontrer et de leur évolution durant l'horizon décisionnel,
3. informations descriptives de l'état du système hydrique, niveau d'eau dans les réservoirs, caractéristiques physiques des divers équipements.

Utilisant des outils d'aide à la décision, le gestionnaire produit des variantes d'allocation de l'eau qui sont évaluées en terme des critères de décision adoptés pour exploiter le système hydrique. Le choix des critères est essentiellement dicté par les objectifs d'exploitation imposés au système; les critères varient considérablement d'un système à un autre. Souvent, et surtout si la décision ne se fonde que sur un seul critère, il s'exprimera en une valeur monétaire, par exemple le bénéfice net annuel de l'exploitation du système. La décision peut aussi se prendre en fonction de plusieurs critères; à des critères économiques se greffent d'autres mesures comme des indices environnementaux ou des estimations du risque de défaillances particulières du système (Hashimoto et al, 1982; Tremblay, 1989). Le problème est alors placé dans un environnement décisionnel multicritère (Goicoechea, Hansen et Duckstein, 1982; Haimes et Hall, 1982; Hwang et Masud, 1979; Harboe, 1992; Tecle, 1992). La croissance phénoménale du nombre des méthodes d'analyse multicritère permet de les classer selon différentes typologies (Mamadou Abdou et Seini Modi, 1993). Les critères

peuvent ne pas être de nature économique; c'est d'ailleurs l'avenue suivie dans la formulation du problème étudié dans cette recherche doctorale.

Diverses stratégies sont suivies en exploitation des systèmes hydriques, notamment ceux dotés de réservoirs d'emmagasinement (régularisation des apports naturels). Sans être trop réductionniste, il est possible de définir deux grandes classes de stratégies:

- La première étudie au début de chaque période décisionnelle (l'état du système étant alors connu), souvent d'une durée hebdomadaire ou mensuelle, les variantes d'allocations pour un horizon plus étendu que la prochaine période (horizon typiquement annuel); les diverses allocations pour la période en cours sont alors déterminées et effectuées. Les apports réels de la période se produisent et amènent le système dans un nouvel état à la fin de la période où la même stratégie est à nouveau suivie. Des prévisions des apports naturels peuvent avantageusement être utilisées dans l'étude des allocations à effectuer. Cette stratégie que nous nommons de type 1, est intéressante car elle prend en compte les bénéfices à long terme de l'exploitation du système; elle le fait indirectement par les conditions finales imposées au système dans l'étude réalisée au début de chaque période décisionnelle. Méjia, Egly et Leclerc A. (1974) illustrent bien cette stratégie de type 1.

- La seconde stratégie détermine une fois pour toute (pour un horizon décisionnel à moyen terme), les meilleures allocations à effectuer considérant l'état du système au

début de la période de décision. Cette stratégie utilise des outils de calcul qui travaillent dans un environnement stochastique et qui définissent les allocations en fonction des états du système. Les politiques ainsi définies indiquent les allocations à faire ou le prélèvement des réservoirs à effectuer en fonction de l'état du système. Les politiques dérivées par programmation dynamique stochastique (Loucks et al, 1981; Tremblay, 1989; Guerrero-Acosta, 1989, entre autres) et les règles d'opération de réservoirs sont des exemples de ce type de stratégie.

Les techniques numériques décrites par Yeh (1985) et Wurbs (1993) dans leur revue de littérature s'appliquent à l'une ou à l'autre de ces stratégies; la technique choisie constitue la base de la formulation du problème qui, elle, doit tenir compte des individualités de mise en oeuvre de chaque situation d'allocation.

Cette recherche doctorale porte sur le problème de l'allocation de quantités d'eau limitée entre des utilisateurs conflictuels. Il s'agit, en effet, de porter un regard additionnel sur ce problème qui demeure très critique pour les pays soumis à des climats de mousson et souvent à des pénuries importantes de pluviosité, causant des sécheresses chroniques comme c'est le cas des pays situés en région sahélienne.

## 1.2 Thème de cette recherche doctorale

Le thème principal de cette recherche est la gestion d'un système hydrique notamment en périodes de pénuries qu'occasionne la faible hydraulicité d'un cours d'eau. Cette question d'un grand intérêt en climat tempéré, devient d'intérêt vital dans les pays soumis à de sévères et fréquentes pénuries. Dans les deux cas, il faut trouver la meilleure façon d'exploiter le système hydrique compte tenu de ses caractéristiques physiques, de celles des apports naturels connues par les séries historiques et des critères de décision.

Cette recherche porte d'abord un regard critique sur une technique mathématique appliquée initialement par Sigvaldason (1976) à l'exploitation d'un système hydrique composé de nombreux éléments, technique récemment appliquée par plusieurs chercheurs à l'exploitation de systèmes hydriques de configuration et d'utilisation particulières. Cette technique dont les diverses applications à l'exploitation d'un système hydrique sont discutées en section 2.4, est celle du flot minimum dans un réseau de capacité limitée. Elle est retenue pour étude détaillée parce qu'elle permet de formuler le problème de l'allocation en terme des déficits ou des surplus mesurés par rapport à des valeurs cibles. La fonction économique peut alors s'écrire directement en terme de ces variables de même que les contraintes. La programmation linéaire appliquée directement à la configuration du système et dont la fonction économique maximise les productions

qu'engendrent les allocations d'eau ne peut prendre effectivement en compte les surplus et les déficits, toujours évalués par rapport à des valeurs cibles.

Évaluer le potentiel de cette technique réseau pour gérer un système hydrique explicitement en terme des déficits dans les allocations constitue l'objectif principal de cette recherche. Il est en effet difficile dans une formulation classique de programmation linéaire d'introduire les déficits et les surplus dans la fonction économique. Le faire rend le problème non linéaire et impose de le résoudre par des techniques spéciales qui permettent de traiter des variables entières. Évaluer l'applicabilité de cette technique à l'exploitation d'un système hydrique soumis à des conditions de faible hydraulicité et développer un formalisme pour représenter mathématiquement le problème de l'allocation de l'eau disponible se veulent les contributions principales de ce projet de recherche.

Le cas choisi pour évaluer l'application de cette technique est l'exploitation du système hydrique de Kandadji, projet à fins multiples proposé pour mettre en valeur les eaux du fleuve Niger. Il permettra non seulement de tester l'outil de calcul mis au point, mais aussi d'étudier le comportement des solutions produites sous diverses fonctions de pénalité et d'investiguer la question particulière de grand intérêt pour un projet de mise en valeur du territoire et de la ressource en eau dans une région soumise à des sécheresses fréquentes et sévères, celle du niveau souhaitable de développement.

Le choix du niveau de développement: ce choix suscite une question étroitement lié au concept de développement durable du territoire et des ressources à mettre en valeur. En région soumise à de sévères pénuries d'eau, certaines années verront leurs apports d'eau en saison sèche être très fortement déficitaires tandis que, durant d'autres années, ils seront au voisinage ou supérieurs à la moyenne. Un niveau de développement basé sur des apports en saison sèche largement déficitaires pourrait mener à un sous-développement du territoire et des ressources; par contre, un développement basé sur des apports moyens ou optimistes pourrait engendrer des mises en culture que le système ne pourrait que très irrégulièrement soutenir. Cette question de développement durable est abordée par l'entremise de l'évolution des productions agricoles (déterminées pour l'ensemble des superficies exploitables), le système étant exploité à l'aide de l'outil mis au point dans cette recherche.

Dans cette recherche, nous avons mis au point un outil de calcul qui prend explicitement en compte les déficits en eau mesurés par rapport à des allocations cibles, pour décider des diverses allocations en eau à chaque période décisionnelle. Cet outil modélise le système comme un réseau où des arcs décrivent explicitement les surplus et les déficits auxquels sont ensuite appliqués des fonctions de pénalité. Ces dernières permettent de gérer les surplus et les déficits. Le développement et l'évaluation de cet outil de calcul constitue le coeur de notre projet de recherche doctorale. Le formalisme de modélisation

mis au point est présenté de même que l'algorithme de calcul de calcul suivi avant d'illustrer son utilisation au cas d'étude du système hydrique de Kandadji au Niger, système à fins multiples. L'innovation de ce projet de recherche porte sur le formalisme de modélisation d'un système hydrique par l'approche réseau, sur l'allocation de l'eau entre divers utilisateurs dans un environnement sahélien et sur l'évaluation des potentiels qu'offre cet outil conçu pour gérer les déficits en eau dans un environnement soumis à des saisons sèches particulièrement sévères et dans un contexte de développement durable.

## 1.3 Impacts des déficits

Les déficits en eau n'ont pas tous le même impact sur la production, dépendamment de la nature de la production. Considérons le cas de la production hydroélectrique et de la production agricole.

### Production hydroélectrique

Un déficit se traduit par une production d'électricité réduite pour la période d'exploitation en cours. Cette baisse de production ne se répercute pas sur les autres périodes d'exploitation. Le déficit pourrait arriver à une autre période sans résulter en une perte électrique différente. Du point de vue du gestionnaire, le moment où il accepte

le déficit en eau est fonction de la valeur économique du kilowattheure au moment où le déficit survient. La fonction économique est séparable de période en période en regard des pertes engendrées par un déficit.

**Production agricole**

Le moment où le déficit en eau d'irrigation se produit influence la productivité de la plante car sa durée de croissance et de maturation s'étale sur plusieurs périodes de décision, typiquement de 4 à 6 mois. L'effet d'un déficit subi par la plante dans une de ses périodes de développement, est ressenti dans les périodes ultérieures; il y a une baisse de productivité estimée par rapport à une plante qui n'aurait expérimenté aucun déficit en eau. La fonction économique n'est pas séparable car une action subie à une période a une influence aux périodes futures.

Les pertes de productivité occasionnées par les déficits en eau sur la plante sont plus ou moins sensibles selon le stade de croissance auquel les déficits sont alloués. Selon une étude de Doorenbos et Kassam (1979), pour la plupart des cultures, les pertes de productivité dues au déficit en eau d'irrigation, sont plus prononcées aux stades de floraison et de formation des graines qu'à ceux de montaison et de maturation. La diminution de productivité est quantifiée par un facteur-réponse de productivité $K_y$ , qui donne la relation entre le déficit relatif de l'évapotranspiration et la perte relative de

productivité en fonction du stade de croissance. Cette relation est linéaire pour des déficits allant jusqu'à 50%. Pour agréger l'effet des déficits en eau survenus sur toutes les phases de croissance, on utilise le principe de Boulé pour dériver la productivité finale. Les facteurs-réponses de productivité deviennent alors multiplicatifs. Ainsi on a le rapport suivant:

$$Y_a/Y_m = \prod_{r=1}^{R} [1 - K_{yr}(1 - ET_a/ET_m)_r] \qquad (1.1)$$

où:

r: indice du stade de croissance

R: nombre de stades de croissance

$Y_a$: productivité actuelle

$Y_m$: productivité maximale

$ET_a$ : évapotranspiration actuelle

$ET_m$ : évapotranspiration maximale

$K_y$: facteur-réponse de productivité

Le terme $(1 - ET_a/ET_m)$ représente le déficit relatif d'irrigation par rapport à l'évapotranspiration maximale. L'équation (1.1) permet de calculer la productivité d'une culture à la récolte par rapport à la productivité maximale, connaissant les déficits en eau d'irrigation durant les stades de croissance. Les facteurs-réponses de productivité $K_y$ de la culture donnée sont connus à priori. Par exemple, pour le riz paddy, le facteur-réponse de productivité est présenté au tableau 1.1.

**Tableau 1.1: Facteur-réponse de productivité du paddy**

| Phase de croissance | Durée (semaines) | $K_y$ |
|---|---|---|
| Montaison | 9 | 1.1 |
| Floraison et germination | 4 | 2.3 |
| Formation de graines et maturation | 5 | 0.3 |

Du point de vue de la sensibilité au déficit en eau, on peut remarquer que le paddy est très vulnérable aux stades de montaison et de floraison.

## 1.4 Buts du projet

Le projet de recherche porte sur l'exploitation d'un système hydrique à buts multiples en périodes de pénurie. Les buts du travail sont de:

(1) développer un formalisme de représentation d'un système hydrique par la technique réseau;

(2) développer un outil d'exploitation pour valider et évaluer l'approche de modélisation proposée. Cet outil doit permettre de prioriser les demandes à satisfaire, d'identifier les compromis possibles entre les satisfactions des différentes demandes du système;

(3) étudier le comportement du système hydrique de Kandadji et déterminer les niveaux de production pour en tirer des conclusions pertinentes au développement durable. L'irrigation des terres agricoles et la production

hydroélectrique sont les deux objectifs principaux poursuivis par l'aménagement de ce système.

## 1.5 Plan de la thèse

Les bases théoriques liées à la méthode OKA et le fonctionnement de l'algorithme lui-même sont présentés dans la première partie du chapitre 2. La seconde partie présente une synthèse de la littérature sur des applications d'OKA à l'exploitation de systèmes hydriques.

Le développement du formalisme de représentation d'un système hydrique par la technique réseau et le développement de l'outil d'exploitation constituent l'objet du chapitre 3. On y présente d'abord une description systémique de l'environnement d'exploitation du réservoir de Kandadji et l'approche de modélisation réseau utilisée. Ensuite, l'outil d'exploitation mis au point, en l'occurrence le modèle KANDOKA, est présenté avec les modalités de son utilisation.

Par la suite, KANDOKA est utilisé pour réaliser plusieurs études sur le comportement du système hydrique de Kandadji pour valider et évaluer la formulation proposée. Ceci constitue le chapitre 4.

La première étude analyse le comportement du système sous divers vecteurs de coefficients de pénalité et détermine le meilleur compromis possible entre les différents objectifs d'exploitation. Le vecteur représentant le meilleur compromis en regard des niveaux de production en saison sèche est sélectionné.

La seconde étude compare les niveaux de production en périodes d'apports faibles et d'apports moyens.

La troisième étude évalue les répercussions du rehaussement du débit réservé sur la satisfaction des autres objectifs d'exploitation. En d'autres termes, cette étude donne des informations nécessaires à l'établissement de la valeur du débit réservé.

La quatrième étude porte sur l'analyse de l'influence d'une diminution de l'emmagasinement du réservoir en début de saison sèche sur les niveaux de production du système.

La cinquième étude détermine le comportement du système lorsque la contrainte sur l'emmagasinement cible du réservoir en fin de saison sèche est supprimée.

Le chapitre 5 porte sur l'analyse de l'exploitation hebdomadaire du réservoir sur 14 années d'apports observés, disponibles à la station de Kandadji. Cette étude détermine les niveaux de production en regard des objectifs d'exploitation à moyen terme du système pour en tirer des conclusions relatives au développement durable.

Le chapitre 6 présente une vue d'ensemble des résultats obtenus dans cette recherche et ouvre sur les perspectives de recherche future.

# CHAPITRE II: LA THÉORIE DES RÉSEAUX APPLIQUÉE AUX SYSTÈMES HYDRIQUES

Après avoir, au chapitre 1, présenté les composantes de la mise en valeur de l'eau et des ressources d'un territoire, défini le problème de l'allocation de l'eau entre des utilisateurs, discuté des questions que suscite l'exploitation d'un système hydrique en région soumise à de sévères pénuries d'eau et énoncé les objectifs de ce projet de recherche, ce second chapitre jette les bases de l'outil de calcul choisi pour aider les gestionnaires à exploiter le mieux possible le système hydrique. On y aborde successivement les définitions préalables sur les réseaux, la formulation générale du problème du flot au coût minimal, l'algorithme de résolution et ses bases théoriques. Une revue de littérature portant sur l'application de cet algorithme en gestion de systèmes hydriques complète ce chapitre.

## 2.1 Définitions préalables

La théorie des graphes et des réseaux est une branche de la recherche opérationnelle utilisée dans l'étude des problèmes dont la schématisation est celle d'un réseau. La représentation planaire d'un réseau révèle des points nodaux, des centres, tous étant reliés par des arcs, des liaisons. Sur les arcs ou liaisons, existe un flot parti d'une ou

plusieurs sources et transitant d'un centre à un autre jusqu'à des noeuds terminaux qui sont des puits. En langage réseau, les liaisons sont des *arcs* et les centres des *noeuds*. Le graphe réseau définit univoquement la structure du système qu'il schématise, par le nombre de noeuds, le nombre et la disposition des arcs.

Un système hydrique peut se modéliser par un réseau. Les centres ou noeuds représentent des réservoirs, des confluences de cours d'eau, des sites d'apports d'eau ou de demande. Les liaisons ou arcs représentent des cours d'eau et des canaux, éléments physiques du système hydrique; les arcs sont aussi utilisés pour décrire des niveaux cibles (volume d'emmagasinement, débit visé), des surplus ou des déficits. Ils sont aussi utilisés pour les transferts entre deux périodes de l'horizon décisionnel. Au chapitre 3, la modélisation du système hydrique de Kandadji au Niger, illustrera ces diverses utilisations des arcs.

En gestion des ressources hydriques, les réseaux étudiés sont des abstractions des systèmes réels et, prenant du recul vis-à-vis des éléments usuels de tels systèmes, on s'occupe uniquement des noeuds, des arcs et des fonctions d'arcs qui sont des caractéristiques quantitatives (capacité, débit, apport, demande, coût) des éléments du graphe. La théorie des réseaux est utilisée comme canevas pour l'étude des propriétés des systèmes qui dépendent à la fois de la forme et de la fonction d'arc.

On définit un réseau orienté dans lequel les noeuds sont reliés par des arcs à travers lesquels une quantité homogène peut s'écouler dans un sens unique. Cette quantité est le *flot* $q_{ij}$ dans l'arc reliant le noeud *i* au noeud *j*. Le flot traversant un arc peut être limité. La limite supérieure $u_{ij}$ est appelée capacité de l'arc. Une borne inférieure $l_{ij}$ , en dessous de laquelle le flot dans l'arc (i,j) ne peut pas descendre, est imposée. Lorsqu'elle n'est pas explicitement précisée, une valeur nulle ($l_{ij}$=0) est imposée. La capacité limite les valeurs que peut prendre le flot. Dans tous les arcs on a:

$$0 \leq l_{ij} \leq q_{ij} \leq u_{ij} \qquad (2.1)$$

Un coefficient de coût $c_{ij}$ est associé à chaque unité de flot dans l'arc (i,j). C'est un coût unitaire pouvant prendre une valeur comprise entre $-\infty$ et $+\infty$; ce coefficient représente ce qu'il en coûte de transiter une unité de flot sur l'arc (i,j).

La figure 2.1a, empruntée de Jensen et Barnes (1980), représente un réseau avec des noeuds-sources et des noeuds-puits. Le couple de nombres associé à chaque arc représente respectivement la capacité et le coût du flot sur l'arc. Le flot minimal n'étant pas précisé, est supposé égal à zéro. Les paramètres de ces arcs traduisent les caractéristiques internes propres au sytème représenté par ce réseau. Le triplet de nombres associé à chaque noeud désigne respectivement un apport ou une demande fixe (nombre positif pour un apport et négatif pour une demande), l'augmentation possible de l'apport ou de la demande, et le coût unitaire associé à cette augmentation. L'apport et la demande fixes ont un coût égal à zéro. Les paramètres de ces noeuds (que nous

définissons au chapitre 3, des noeuds périphériques) représentent les liens du système avec l'environnement extérieur. Par exemple, au noeud A le système reçoit un apport fixe de 3 unités augmentables de 2 unités au coût unitaire de 1. Au noeud B, le système ne reçoit pas d'apport fixé, mais peut recevoir un apport potentiel maximal d'1 unité au coût de -1. Au noeud C, le système peut être sollicité pour une demande potentielle maximale de 2 unités au coût de 1. Enfin par le noeud D, le système est sollicité pour une demande fixe de 5 unités non augmentables.

On propose de transformer le réseau de la figure 2.1a en un réseau fermé pour représenter un système autonome coupé de l'extérieur, mais prenant en compte toutes les caractéristiques relationnelles (contraintes d'apport et de demande) avec l'environnement extérieur.

Pour ce faire, on définit un noeud entrée *s* d'où part tout le flot, et un noeud sortie *t* où parvient tout le flot (figure 2.1b). On suppose d'abord qu'il n'entre pas de flot par l'entrée; qu'aucun flot ne quitte la sortie; que ce flot ne pénètre pas en un noeud autre que le seul noeud-source s et qu'il n'aboutit pas en un noeud autre que le seul noeud-puits t.

Chaque apport (fixe ou possible) en un noeud i est représenté par un arc reliant la source s au noeud i. L'arc d'apport fixe a un flot minimal et une capacité égaux à la valeur fixée de l'apport, et est muni d'un coût zéro. L'arc d'augmentation possible d'apport a un flot

minimal égal à zéro et une capacité égale à la valeur de l'augmentation maximale. On associe à cet arc le coût unitaire de l'augmentation potentielle d'apport.

De la même façon, chaque demande (fixe ou possible) en un noeud i est représentée par un arc reliant le noeud i au puits t.

Soit V le flot total de s à t, N l'ensemble des noeuds du graphe et n le nombre de noeuds dans N: les conditions précédentes peuvent être écrites sous forme d'équations de conservation de flot:

$$\sum_{j=1}^{n} q_{sj} = V \qquad j \in N \qquad (2.2)$$

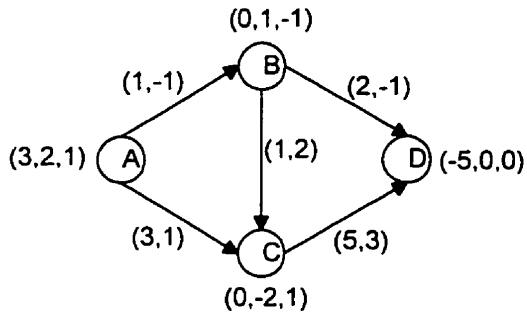
$$\sum_{i=1}^{n} q_{ix} - \sum_{j=1}^{n} q_{xj} = 0 \qquad \forall\, x \in N\backslash\{s,t\} \qquad (2.3)$$

$$\sum_{i=1}^{n} q_{it} = V \qquad i \in N \qquad (2.4)$$

Tout vecteur de flot satisfaisant ces équations est un vecteur faisable.

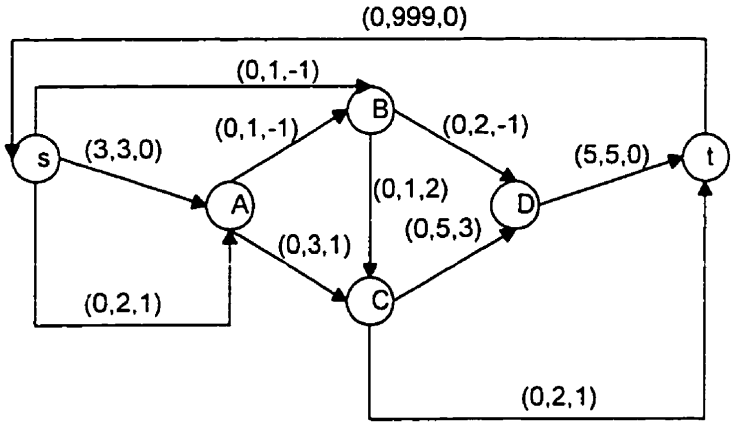
Finalement, on relie la source s et le puits t par un arc de retour (t,s) dont le flot minimal est zéro et la capacité une valeur assez grande. On associe à cet arc le coût zéro. L'objectif d'un tel arc est d'assurer la conservation de flot autant au noeud s qu'au noeud t (auxquels l'équation 2.3 devient applicable).

On parlera alors de réseau de circulation ou tout simplement *circulation* (figure 2.1b).




(a)

**Réseau avec noeuds-sources et noeuds-puits**




(b)

**Circulation équivalente au réseau de la figure (a)**

**Figure 2.1: Transformation d'un réseau avec noeuds-sources et noeuds-puits en un réseau de circulation**

## 2.2 Le problème du flot au coût minimal

On considère le réseau de circulation défini précédemment. On veut déterminer le vecteur de flot qui minimise le coût total qui lui est associé, en maintenant le flot dans les limites définies sur chaque arc.

Le problème du flot au coût minimal peut être ramené à un problème d'allocation d'une ressource disponible entre plusieurs utilisateurs pour satisfaire la demande à un coût minimal. Sa formulation, adaptée à une méthode de résolution qui sera présentée, est la suivante:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} c_{ij}\, q_{ij} \qquad (2.5)$$

$$\text{sujet à:} \quad \sum_{i=1}^{n} q_{ix} - \sum_{j=1}^{n} q_{xj} = 0 \qquad \forall\, x \in N \qquad (2.6)$$

$$q_{ij} \geq l_{ij} \qquad \forall\, i, j \in N \qquad (2.7)$$

$$q_{ij} \leq u_{ij} \qquad \forall\, i, j \in N \qquad (2.8)$$

L'équation (2.6) représente la contrainte de conservation du flot, i.e la somme de toutes les unités de flot qui arrivent à un noeud doit être égale à la somme de toutes les unités qui en sortent, et cela quel que soit le noeud. Les équations (2.7) et (2.8) décrivent respectivement la contrainte du flot minimal et celle du flot maximal dans un arc quelconque.

## 2.3 L'algorithme "out-of-kilter" (OKA)

Cette méthode de résolution, unique en son genre dans la littérature de recherche opérationnelle (Kennington et Helgason, 1980), a été développée dans les années '60 par Delbert Fulkerson (1961). Elle est spécifiquement appliquée aux réseaux à capacité limitée pour le problème du flot au coût minimal. Le réseau sur lequel elle opère est un réseau de circulation.

### 2.3.1 Conditions d'optimalité

L'algorithme utilise les conditions d'optimalité de Kuhn-Tucker (Bazaraa et Jarvis, 1977; Jensen et Barnes, 1980) en particulier le théorème de la complémentarité des écarts (TCE) pour rechercher une solution optimale. Pour ce faire, on définit les variables duales suivantes:

- $\Pi_i$ et $\Pi_j$ , aussi appelés potentiels nodaux en i et j pour répondre à la contrainte de conservation du flot aux noeuds,
- $\delta_{ij}$ et $\omega_{ij}$ des variables de décision associées à la contrainte du flot maximal et celle du flot minimal dans l'arc (i,j),

Ainsi le dual du problème du flot au coût minimum devient:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} (\delta_{ij} u_{ij} + \omega_{ij} l_{ij}) \qquad (2.9)$$

sujet à:

$$\Pi_i - \Pi_j + \delta_{ij} - \omega_{ij} \geq -c_{ij} \qquad \forall \Pi_i, i \in N \qquad (2.10)$$

$$\delta_{ij} \geq 0 \qquad \forall i, j \in N \qquad (2.11)$$

$$\omega_{ij} \geq 0 \qquad \forall i, j \in N \qquad (2.12)$$

D'après le TCE:

. pour le problème primal,

- si une variable de décision est strictement positive dans la solution optimale, la contrainte duale correspondante doit être, à l'optimum, satisfaite en tant qu'égalité;
- si une contrainte est, pour la solution optimale, satisfaite en tant qu'inégalité stricte, la variable duale associée est nulle à l'optimum.

. pour le problème dual,

- si une variable de décision est strictement positive dans la solution optimale, la contrainte primale à laquelle elle est associée, est satisfaite, à l'optimum, en tant qu'égalité;

- si une contrainte est, pour la solution optimale, satisfaite en tant qu'inégalité stricte, la variable primale qui lui correspond est nulle à l'optimum.

Le TCE implique:

$$\omega_{ij} > 0 \quad \Rightarrow \quad q_{ij} = l_{ij}$$

$$\delta_{ij} > 0 \quad \Rightarrow \quad q_{ij} = u_{ij}$$

$$q_{ij} > 0 \quad \Rightarrow \quad \Pi_i - \Pi_j + \delta_{ij} - \omega_{ij} = -c_{ij}$$

Par conséquent, à l'optimum (s'il existe), il est impossible d'avoir à la fois $\delta_{ij}$ et $\omega_{ij}$ tous deux strictement positifs (à l'exception du cas particulier où $l_{ij}=u_{ij}$). $\delta_{ij}$ et $\omega_{ij}$ peuvent cependant tous deux être nuls et dans ce cas on a $l_{ij} \leq q_{ij} \leq u_{ij}$.

On pose $d_{ij} = \Pi_i - \Pi_j + c_{ij}$, pour l'arc (i,j). $d_{ij}$ est le coût réduit par rapport aux potentiels $\Pi_i$ et $\Pi_j$. L'équation (2.10) devient:

$$d_{ij} \geq \omega_{ij} - \delta_{ij}$$

Donc on a:

$$d_{ij} > 0 \quad \Rightarrow \quad \omega_{ij} > 0 \quad \Rightarrow \quad q_{ij} = l_{ij} \qquad (2.13)$$

$$d_{ij} < 0 \quad \Rightarrow \quad \delta_{ij} > 0 \quad \Rightarrow \quad q_{ij} = u_{ij} \qquad (2.14)$$

Ce sont les conditions d'optimalité nécessaires et suffisantes autour desquelles fonctionne l'algorithme OKA. En d'autres termes, il s'agit de chercher les flots $q_{ij}$ et les potentiels $\Pi_i$, $\Pi_j$, de manière à satisfaire les conditions (2.13) et (2.14). Les valeurs initiales de ces variables peuvent être choisies arbitrairement et sont ajustées au moyen de l'algorithme. Les variables de décision $\delta_{ij}$ et $\omega$ij n'apparaissent pas de façon explicite.

En définitive, un vecteur de flot $q_{ij}$ (avec des potentiels de noeud donnés) est optimal si et seulement s'il respecte la conservation du flot et si chaque arc du réseau transitant un flot positif est dans l'un des états suivants:

$$(\alpha) \quad d_{ij} > 0, \; q_{ij}=l_{ij} \tag{2.15}$$

$$(\beta) \quad d_{ij} = 0, \; l_{ij} \leq q_{ij} \leq u_{ij} \tag{2.16}$$

$$(\rho) \quad d_{ij} < 0, \; q_{ij}=u_{ij} \tag{2.17}$$

Lorsqu'un arc est dans l'un des états $\alpha$, $\beta$, ou $\rho$ , on dit qu'il est "in-kilter" c'est à dire conforme aux conditions d'optimalité. Dans la négative, il est "out-of-kilter" ou non conforme et se trouve dans l'un des états ci-dessous (qui sont des négations des propositions (2.15) à (2.17)):

$$(\alpha_1) \quad d_{ij} > 0, \; q_{ij} < l_{ij} \tag{2.18}$$

$$(\alpha_2) \quad d_{ij} > 0, \; q_{ij} > l_{ij} \tag{2.19}$$

$$(\beta_1) \quad d_{ij} = 0, \; q_{ij} < l_{ij} \tag{2.20}$$

$$(\beta_2) \quad d_{ij} = 0, \; q_{ij} > u_{ij} \tag{2.21}$$

$$(\rho_1) \quad d_{ij} < 0, \; q_{ij} < u_{ij} \tag{2.22}$$

$$(\rho_2) \quad d_{ij} < 0, \; q_{ij} > u_{ij} \tag{2.23}$$

Les états $\alpha$, $\beta$, $\rho$, $\alpha_1$, $\alpha_2$, $\beta_1$, $\beta_2$, $\rho_1$, et $\rho_2$ sont appelés par des états de conformité et sont schématisés dans le tableau 2.1.

**Tableau 2.1: États de conformité d'un arc**

| | $d_{ij} < 0$ | $d_{ij} = 0$ | $d_{ij} > 0$ |
|---|---|---|---|
| $q_{ij} > u_{ij}$ | non conforme | non conforme | non conforme |
| $q_{ij} = u_{ij}$ | ***conforme*** | ***conforme*** | non conforme |
| $l_{ij} < q_{ij} < u_{ij}$ | non conforme | ***conforme*** | non conforme |
| $q_{ij} = l_{ij}$ | non conforme | ***conforme*** | ***conforme*** |
| $q_{ij} < l_{ij}$ | non conforme | non conforme | non conforme |

### 2.3.2 Description de l'algorithme de résolution

Le flot dans le réseau défini précédemment est optimal lorsque chaque arc est dans l'un des états $\alpha$, $\beta$ ou $\rho$. Si un ou plusieurs arcs sont dans un état non conforme, alors le flot n'est pas optimal. L'objectif de l'algorithme OKA est justement de ramener tous les arcs à l'état conforme.

OKA débute avec un vecteur de flot initial qui satisfait la contrainte de conservation du flot aux noeuds et des valeurs données arbitrairement aux potentiels de noeud. L'algorithme comporte une procédure itérative de modification du flot et des potentiels

nodaux de manière à diriger tous les arcs à rentrer en satisfaction avec l'une des conditions $\alpha$, $\beta$ ou $\rho$. Après chaque itération, le vecteur de flot résultant approche davantage la solution optimale lorsque celle-ci existe (Ahuja et al, 1993). Après un nombre fini d'itérations, OKA garantit une solution optimale ou, dans le cas échéant, découvrira qu'il n'existe pas de solution faisable.

La convergence de l'algorithme vers la solution optimale (si elle existe), est assurée car, d'une itération à l'autre, l'état d'un arc conforme n'est pas détruit et la contrainte de flot sur l'arc demeure satisfaite. Il en est ainsi pour la conservation du flot aux divers noeuds.

La figure 2.2 présente les quatre grandes étapes de l'algorithme, classées par activité spécifique (Jensen et Barnes, 1980):

1. Initialiser les flots et les potentiels nodaux (des nombres entiers par supposition)
2. Trouver un arc non conforme
3. Maintenir les potentiels nodaux constants et modifier le flot dans le réseau dans le but de ramener cet arc à l'état conforme
4. Si la modification de flot est sans succès, maintenir le flot constant et modifier les potentiels de manière à ramener l'arc non conforme à l'état conforme.

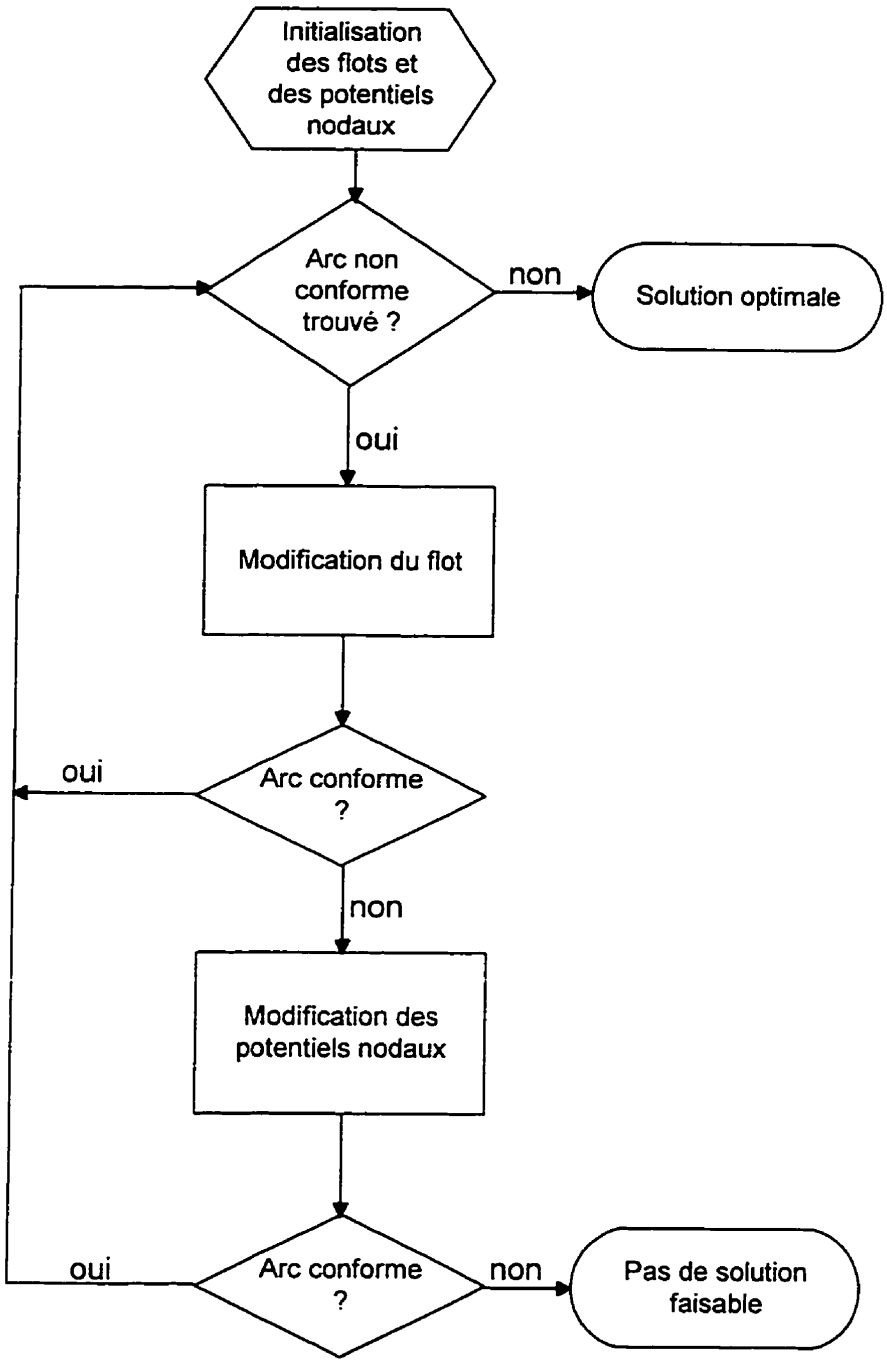



**Figure 2.2: Schéma de l'algorithme OKA**

### 2.3.2.1 Initialisation du flot et des potentiels nodaux

Cette première étape vise à donner des valeurs initiales au flot dans chaque arc du réseau de façon à assurer la conservation du flot à tous les noeuds. Il n'est pas nécessaire a priori que ce flot initial respecte les contraintes de flot sur les arcs. De même, à cette étape, il faut donner une valeur qui peut être arbitraire à chaque noeud (les nombres $\Pi_i$, $\Pi_j$,).Toutes ces valeurs doivent être des nombres entiers car l'algorithme opère sur des des valeurs entières.

### 2.3.2.2 Recherche des arcs non conformes

La recherche d'un arc non conforme se fait par un test d'appartenance à l'un des états $\alpha$, $\beta$, $\rho$, $\alpha_1$, $\alpha_2$, $\beta_1$, $\beta_2$, $\rho_1$, ou $\rho_2$. Lorsqu'un arc (i,j) est sélectionné, le coût unitaire $c_{ij}$ du flot dans cet arc est connu, de même que les potentiels nodaux associés aux deux noeuds extrémités de l'arc. Ainsi l'algorithme calcule le coût réduit $d_{ij}=\Pi_i + \Pi_j - c_{ij}$. Le signe de $d_{ij}$ et le flot $q_{ij}$ dans l'arc étant connus, OKA détermine l'état de conformité de l'arc.

OKA parcourt tout le réseau en commençant par le premier arc jusqu'à ce qu'il rencontre un arc non conforme. Parvenu au dernier arc, si aucun arc non conforme n'est décelé, OKA retrace la solution optimale. Si un arc non conforme est trouvé,

l'algorithme détermine la modification de flot à opérer, i.e la quantité de flot à augmenter ou à diminuer pour ramener cet arc à l'état conforme.

#### 2.3.2.3 Modification du flot

Lorsqu'un arc non conforme est découvert, une modification du flot dans le réseau peut être faite pour ramener l'arc "in-kilter". Les potentiels nodaux restent constants et OKA assure la conservation du flot aux noeuds. Il suffit que le vecteur de flot initial respecte la contrainte de conservation du flot pour que les vecteurs subséquents en fassent autant, car OKA modifie le flot dans un cycle à la fois. Par conséquent, le flot sur tout arc n'appartenant pas au cycle de modification de flot reste inchangé.

L'identification d'un cycle dans lequel le flot sera modifié repose sur les deux principes suivants:

. ne pas entraîner un arc conforme à devenir non conforme

. ne pas entraîner un arc non conforme à devenir davantage non conforme.

Ces deux principes conduisent à introduire pour un arc, un critère d'admissibilité dans un cycle de modification de flot. Le tableau 2.2 résume les modifications de flot possibles dans un arc selon son état de conformité. Selon ce tableau, un arc (i,j) est admissible lorsque le flot peut être augmenté dans cet arc, i.e $q_{ij}<l_{ij}$ ou ($d_{ij}\leq 0$ et $q_{ij}<u_{ij}$).

De même, son opposé (j,i) est admissible lorsque le flot dans l'arc (i,j) peut être diminué, i.e $q_{ij}>u_{ij}$ ou ($d_{ij}\geq 0$ et $q_{ij}>l_{ij}$).

**Tableau 2.2: Modifications de flot possibles sur un arc**

| État de conformité | $d_{ij}$ | $q_{ij}$ | Modification possible | Quantité maximale de la modification | Nouvel état de conformité |
|---|---|---|---|---|---|
| $\alpha$ | $d > 0$ | $q = l$ | aucune | 0 | $\alpha$ |
| $\beta$ | $d = 0$ | $q < u$ | augmentation | $u - q$ | $\beta$ |
| $\beta$ | $d = 0$ | $q > l$ | diminution | $q - l$ | $\beta$ |
| $\rho$ | $d < 0$ | $q = u$ | aucune | 0 | $\rho$ |
| $\alpha_1$ | $d > 0$ | $q < l$ | augmentation | $l - q$ | $\alpha$ |
| $\beta_1$ | $d = 0$ | $q < l$ | augmentation | $u - q$ | $\beta$ |
| $\rho_1$ | $d < 0$ | $q < u$ | augmentation | $u - q$ | $\rho$ |
| $\alpha_2$ | $d > 0$ | $q > l$ | diminution | $q - l$ | $\alpha$ |
| $\beta_2$ | $d = 0$ | $q > u$ | diminution | $q - l$ | $\beta$ |
| $\rho_2$ | $d < 0$ | $q > u$ | diminution | $q - u$ | $\rho$ |

Après qu'un arc ($i_0$, $j_0$) non conforme a été trouvé, l'algorithme aura en même temps déterminé l'augmentation ou la diminution de flot dans cet arc pour le ramener à l'état conforme. À supposer qu'il faut augmenter d'un montant $\Delta q$ le flot dans l'arc ($i_0$, $j_0$) pour le rendre conforme, il devra alors trouver un chemin pour faire passer $\Delta q$ du noeud $j_0$ au noeud $i_0$ à travers le reste du réseau en n'empruntant que des arcs admissibles. De même pour diminuer le flot de $\Delta q$, il faut faire passer $\Delta q$ par des arcs admissibles mais du noeud $i_0$ vers le noeud $j_0$. S'il est possible de trouver un tel chemin, l'arc ($i_0$, $j_0$) deviendra conforme sans entraîner des arcs conformes (ou non conformes) à devenir non

conformes (ou davantage non conformes). En définitive, l'arc ($i_0$, $j_0$) et les arcs contenus dans le chemin trouvé forment un cycle dans lequel on peut modifier le flot.

L'algorithme recherche un cycle de modification de flot par marquage à travers tout le réseau. Par exemple, si l'arc ($i_0$, $j_0$) se trouve dans l'état $\alpha_1$, on assigne au noeud l'étiquette ($i_0$+, $q_{j0}=l_{i0j0}-q_{i0j0}$) c'est à dire qu'il faudrait augmenter le flot de $i_0$ vers $j_0$ d'une quantité $l_{i0j0}-q_{i0j0}$ pour ramener l'arc ($i_0$, $j_0$) à l'état conforme. Ensuite à partir du noeud $j_0$, il faut continuer le marquage des noeuds restants du réseau de manière à se frayer un chemin en joignant les noeuds marqués, pour aboutir au noeud $i_0$.

Chaque fois qu'un noeud est marqué, on fait un test pour vérifier si $i_0$ et $j_0$ sont tous deux marqués. Si tel est le cas, on procède à la modification du flot dans le cycle trouvé en ajoutant la quantité $q_{j0}$ dans tous les arcs du chemin orientés vers l'avant et en retranchant $q_{j0}$ dans tous les arcs orientés en sens opposé. Évidemment, la quantité $q_{j0}$ est ajoutée dans l'arc ($i_0$, $j_0$) qui devient conforme. On passe ensuite à un autre arc non conforme.

Si l'on ne peut plus placer d'autres étiquettes et si l'un des noeuds $i_0$, $j_0$ n'est pas marqué, on tombe dans une impasse car un cycle de modification de flot n'est pas trouvable. À ce moment, il faut procéder à une modification des potentiels nodaux.

#### 2.3.2.4 Modification des potentiels nodaux

Lorsque la modification de flot échoue pour ramener l'arc $(i_0, j_0)$ à l'état conforme, on procède à une modification des potentiels de noeud de manière à rendre $(i_0, j_0)$ conforme ou rendre d'autres arcs admissibles.

L'échec de la modification de flot conduit à définir deux ensembles de noeuds. Soit $N_1$ l'ensemble des noeuds marqués et $N_2$ celui des noeuds non marqués au cours de la recherche du cycle. Étant donné une situation d'impasse à l'étape précédente, certaines caractéristiques des arcs, dont une des extrémités est en $N_1$ et l'autre en $N_2$, sont connues. Soit un arc $(i_1,j_1)$ dont l'origine est en $N_1$ et l'autre extrémité en $N_2$, alors cet arc ne peut pas être dans un état de conformité qui permettrait une augmentation de flot dans $(i_1,j_1)$ parce qu'autrement l'arc deviendrait admissible et $j_1$ serait en $N_1$. Par référence au tableau 2.2, l'arc $(i_1,j_1)$ ne peut être que dans l'un des états du tableau 2.3.

**Tableau 2.3: États possibles d'un arc (i,j) avec $i \in N_1$ et $j \in N_2$**

| États | $d_{ij}$ | $q_{ij}$ | $\Delta\Pi$ pour que (i,j) soit admissible | Nouvel état |
|---|---|---|---|---|
| $\alpha$ | $d > 0$ | $q = l$ | d | $\beta$ |
| $\beta$ | $d = 0$ | $q = u$ | - | $\rho$ |
| $\rho$ | $d < 0$ | $q = u$ | - | $\rho$ |
| $\alpha_2$ | $d > 0$ | $l < q < u$ | d | $\beta$ |
| | | $q \geq u$ | - | $\alpha_2$, $\beta_2$ ou $\rho_2$ |
| $\beta_2$ | $d = 0$ | $q > u$ | - | $\rho_2$ |
| $\rho_2$ | $d < 0$ | $q > u$ | - | $\rho_2$ |

D'après le tableau 2.3, lorsque le flot dans l'arc $(i_1,j_1)$ est inférieur à sa capacité, augmenter $\Pi_{j1}$ équivaudrait à diminuer $d_{i1j1}$ et rendre l'arc $(i_1,j_1)$ admissible.

Soit $(i_2j_2)$ un arc dont l'origine est en $N_2$ et l'autre extrémité en $N_1$; cet arc ne peut pas être dans un état de conformité qui accepterait une diminution du flot dans $(i_2j_2)$ car si cela était, son opposé $(j_2,i_2)$ serait admissible et $i_2$ aurait été marqué. Donc l'arc $(i_2j_2)$ doit se trouver dans l'un des états du tableau 2.4. Il faut de même noter qu'en augmentant $\Pi_{i2}$, $d_{i2j2}$ va diminuer et l'arc $(i_2j_2)$ deviendra admissible.

Par conséquent, la modification des potentiels nodaux se fera en augmentant de $\Delta\Pi$ tous les potentiels des noeuds non marqués (appartenant à $N_2$).

Dans certains cas il est possible de modifier les potentiels nodaux pour ramener directement l'arc $(i_0,j_0)$ à l'état conforme.

**Tableau 2.4: États possibles d'un arc (i,j) avec $i \in N_2$ et $j \in N_1$**

| **États** | $d_{ij}$ | $q_{ij}$ | **$\Delta\Pi$ pour que l'opposé (j,i) soit admissible** | **Nouvel état** |
|---|---|---|---|---|
| $\alpha$ | $d > 0$ | $q = l$ | - | $\alpha$ |
| $\beta$ | $d = 0$ | $q = l$ | - | $\alpha$ |
| $\rho$ | $d < 0$ | $q = u$ | (-d) | $\beta$ |
| $\alpha_1$ | $d > 0$ | $q < l$ | - | $\alpha_1$ |
| $\beta_1$ | $d = 0$ | $q < l$ | - | $\alpha_1$ |
| $\rho_1$ | $d < 0$ | $q \leq l$ | - | $\alpha_1$, $\beta_1$ ou $\rho_1$ |
| | | $l < q < u$ | (-d) | $\beta$ |

Ces cas sont résumés au tableau 2.5. Si le flot $q_{i0j0}$ n'est pas dans l'intervalle $[l_{i0j0}, u_{i0j0}]$, aucune modification de $\Pi$ ne pourra ramener $(i_0,j_0)$ à l'état conforme.

**Tableau 2.5: Modification $\Delta\Pi$ pour ramener $(i_0,j_0)$ à l'état conforme**

| États | $d_{i0j0}$ | $q_{i0j0}$ | Modification $\Delta\Pi$ |
|---|---|---|---|
| $\alpha_1$ | $d > 0$ | $q < l$ | - |
| $\beta_1$ | $d = 0$ | $q < l$ | - |
| $\rho_1$ | $d < 0$ | $q < l$ | - |
| | | $l \leq q < u$ | augmenter $\Pi_i$ de (-d) |
| $\alpha_2$ | $d > 0$ | $l < q \leq u$ | augmenter $\Pi_j$ de d |
| | | $q > u$ | - |
| $\beta_2$ | $d = 0$ | $q > u$ | - |
| $\rho_2$ | $d < 0$ | $q > u$ | - |

Les tableaux 2.3, 2.4 et 2.5 peuvent se résumer comme il suit: un arc qui devient admissible par une simple modification des potentiels nodaux ne peut que se retrouver dans l'état $\beta$.

$\Delta\Pi$ sera choisi comme étant l'augmentation minimale requise pour rendre un arc conforme ou admissible. L'algorithme détermine d'abord si une modification de potentiels nodaux peut amener l'arc $(i_0,j_0)$ à devenir conforme. Si oui, il calcule $\Delta\Pi$ correspondant et passe à travers tous les arcs chevauchant entre $N_1$ et $N_2$, et calcule de même les $\Delta\Pi$ correspondants pour les rendre admissibles. Ensuite, il retient le minimum de tous les $\Delta\Pi$ et l'ajoute à tous les potentiels des noeuds de $N_2$. Si au moins un arc est devenu conforme ou admissible, l'algorithme vérifie si $(i_0,j_0)$ l'est. Si $(i_0,j_0)$ n'est pas

encore conforme, OKA procède à une nouvelle modification de flot. Comme la modification de potentiels nodaux avait rendu au moins un nouvel arc admissible, un cycle de modification de flot pourrait être trouvé à nouveau.

Le processus de modification de flot et de potentiels nodaux continue jusqu'à ce que tous les arcs deviennent conformes ou que l'algorithme annonce qu'il n'y a pas de solution faisable pour le problème. En effet, il n'y a pas de solution faisable si, à l'issue de la modification de potentiels nodaux, aucun arc ne devient conforme et aucun nouvel arc ne devient admissible.

## 2.4 Revue de littérature d'application OKA

Il s'agit d'un résumé de quelques applications de la méthode OKA à la résolution de problèmes d'exploitation des systèmes hydriques. On y fait ressortir les objectifs de chaque cas d'étude, la particularité de la modélisation s'il y a lieu, la modélisation des règles d'opération ou de la priorisation des consignes d'exploitation. On a sciemment, pour certains cas, omis de parler d'arcs lorsqu'ils ne présentent pas de particularité frappante pour la représentation des caractéristiques physiques et opérationnelles du système.

### 2.4.1 Étude du système de la rivière Trent (Sigvaldason, 1976)

Le système est constitué de 48 réservoirs et 50 canaux. Son exploitation doit rencontrer les objectifs de contrôle de crue, d'approvisionnement en eau, de production d'hydroélectricité et de soutien d'étiage. Des conflits grandissants sont apparus entre les satisfactions des différentes demandes en eau dans le bassin de la rivière, ce qui a conduit à l'évaluation formelle des politiques d'exploitation du système.

L'auteur a d'abord fait appel au côté descriptif d'OKA en l'utilisant comme modèle de simulation. La formulation utilisée est celle d'un réseau à capacité. L'expérience et l'observation de l'opérateur en chef sont utilisées pour définir des états cibles représentant le fonctionnement idéal du système.

Chaque réservoir est divisé en 5 zones dont le découpage correspond en ordre à la réserve morte, une réserve-tampon, une réserve utile, une réserve de revanche de crue et une zone de déversement Pour chaque réservoir, au concept de zonage est associée une règle d'opération à référence temporelle. C'est une courbe du niveau optimal du réservoir à l'intérieur de la réserve utile en fonction du temps. Le fonctionnement idéal du système implique que chaque réservoir respecte sa règle d'opération. Il existe 6 arcs pour mesurer la déviation dans les zones de part et d'autre du niveau cible défini par la règle d'opération.

Chaque canal est divisé en tranches de débit en fonction de la demande ou de la zone d'opération du réservoir directement en amont. La déviation du flot normal dans chaque canal est représentée par 4 arcs.

La fonction économique est définie en terme de pénalités associées à la violation de la règle d'opération et du flot normal dans les canaux. C'est ici qu'intervient l'utilisation d'OKA comme modèle d'optimisation en regard de l'interprétation des coefficients introduits dans la fonction économique. En fait, les politiques d'opération évaluées résultent des différentes combinaisons ou attributions de ces coefficients à partir:

. du concept de priorité entre les réservoirs: égale priorité correspondant à l'opération dans la même zone, ou de priorité différente dépendamment de la situation de la zone par rapport à la règle d'opération,

. de la relation entre le niveau d'emmagasinement des réservoirs et des limites de flot dans les canaux.

Ces relations sont bâties à partir de l'expérience de l'opérateur en chef et, conceptuellement, certaines peuvent être postulées pour explorer d'autres politiques alternatives.

OKA a permis, dans cette étude, une modélisation simplifiée d'un système complexe avec des configurations différentes de réservoirs. Les résultats présentés montrent que le modèle utilisé constitue un outil efficace pour l'évaluation de politiques alternatives

pour la planification du système de la rivière Trent. Il a servi à la planification de l'exploitation en période de récréation estivale ainsi qu'en période de remplissage et de vidange des réservoirs.

### 2.4.2 Simulation de l'aqueduc de Californie (Chung et al, 1989)

La délimitation géographique du système concerne la jonction du "California State Water Project" (SWP) et du "Federal Central Valley Project" (CVP), située au sud du delta des rivières Sacramento et San Joaquin. Le système est constitué d'un canal, ouvert en grande partie et long de 300 miles. Le canal est jalonné de plusieurs stations de pompage, de réservoirs et d'ouvrages de prise d'eau, puis se termine par deux branches se jetant respectivement aux lacs Castaic et Perris. Le Département des Ressources en Eau de Californie utilisait jusqu'alors un modèle de simulation développé sur le procédé "mass balance accounting" pour gérer l'aqueduc. Cette méthode présente un inconvénient majeur: elle procède à l'allocation des prélèvements séquentiellement aux points de demande, en commençant de l'amont vers l'aval, si bien qu'en période de basse hydraulicité, les demandes à l'aval sont les premières à souffrir de déficit indépendamment de l'intention du gestionnaire. La faiblesse de cette méthode a conduit à l'incorporation de la technique OKA dans le modèle de gestion. Elle permit alors d'établir une priorisation des points de demande et d'allocation des zones des réservoirs.

Chaque réservoir est divisé en 3 zones principales: une réserve morte, une réserve utile et une réserve de contrôle de crue. La réserve utile est subdivisée en 3 sous-zones opérationnelles dont la délimitation varie en fonction du mois. Un niveau cible est défini à l'intérieur de la réserve utile et sert uniquement de repère à la priorisation des zones. Chaque zone est représentée par un arc dont le flot minimal est zéro et la capacité égale à son volume maximal. Chaque demande est désignée par un arc dont le flot minimal est zéro et la capacité égale à sa valeur réelle.

La fonction économique minimise la somme de facteurs de priorité affectés à chaque élément d'exploitation. Ce facteur croît avec le rang de priorité d'allocation. Le plus petit facteur correspond au rang 1 (priorité supérieure). Ainsi l'arc de la zone morte est de priorité supérieure par rapport à ceux de la demande et des zones situées en dessous du niveau cible. Il en est de même pour l'arc des volumes déversés par rapport aux arcs des zones situées au dessus du niveau cible. De cette façon, le système satisfait la demande tant que le niveau du réservoir ne descend pas à l'intérieur de la réserve morte. Cette priorisation assure également que le réservoir ne monte au dessus du niveau cible tant qu'il n'y a pas de déversement auparavant.

Dans cette application, OKA est utilisé au début de chaque mois pour déterminer les quantités minimale et maximale à pomper dans le réseau de la SWP et de la CVP au sud

du delta, de façon à maintenir les niveaux des réservoirs soit dans les zones inférieures de la réserve utile, soit dans sa zone supérieure. OKA a permis de calculer les apports au réseau (qui sont en fait les quantités minimale et maximale à pomper) en tenant compte des éléments influant sur les prélèvements de l'aqueduc. C'est une façon inverse de poser le problème traditionnel d'allocation.

### 2.4.3 Étude du système d'approvisionnement de la ville de Boulder au Colorado (Brendecke et al, 1989)

Le système d'approvisionnement en eau de la ville de Boulder est constitué d'un collecteur d'eau de ruissellement utilisable immédiatement après traitement et d'un réservoir d'eau utilisable pour des besoins futurs. Il y existe également la possibilité, par une entente, d'obtenir d'entités voisines des quantités d'eau destinées à l'irrigation. Toutes ces possibilités d'approvisionnement sont régies par une législation de l'eau portant sur les quantités prélevables. L'objectif de l'étude est de développer un plan directeur du système d'approvisionnement en eau pour des activités industrielles et municipales, pour garantir des débits minimums dans la rivière Boulder, ainsi que pour générer des revenus de la production d'hydroélectricité. L'étude est faite à l'aide de trois formulations résolues par la méthode OKA.

La première formulation a pour objectif de déterminer les quantités maximales divertibles et stockables par la ville de Boulder en fonction de la législation de l'eau dans le bassin de la rivière. Le droit de l'eau impose un rationnement des prélèvements en fonction des variables hydrologiques de la rivière. La multiplicité des articles de la loi et leurs dispositions conflictuelles rendent difficile le prélèvement des quantités légalement divertibles. Le modèle est donc utilisé pour simuler la possibilité d'augmenter ces quantités pour la ville de Boulder tout en respectant les droits des entités voisines introduits comme contraintes, en utilisant une chronique historique de demandes.

Le rationnement est couplé à une conduite, un canal, un segment de rivière, un tributaire ou un réservoir, et est représenté par un arc dont la capacité correspond à la quantité d'eau définie dans l'article du droit de l'eau.

La fonction économique est constituée de coûts associés au rationnement de l'eau. Un facteur de priorité "senior" ou "junior" est affecté à chaque article. Afin d'assurer cette priorisation (dans l'esprit d'OKA), des coefficients moins élevés sont associés aux seniors. Ainsi, les arcs de priorité senior sont les premiers à être satisfaits.

Les résultats produits montrent que les quantités optimales, légalement divertibles, sont de l'ordre de deux à trois fois la demande historique de la ville de Boulder.

La seconde formulation simule l'opération d'un système qui naîtrait de la réalisation de deux projets pour déterminer les avantages que la ville de Boulder pourrait en tirer en y participant. Les capacités des arcs correspondent aux caractéristiques physiques des

ouvrages des deux projets, soit des conduites, des canaux, des tunnels, des stations de pompage et des réservoirs. Les coefficients affectés aux arcs traduisent des politiques d'opération du système résultant.

La dernière formulation représente la simulation du réseau d'approvisionnement de la ville de Boulder en utilisant les quantités légalement divertibles déterminées par le premier modèle. Il fonctionne sur une base mensuelle pour un horizon annuel en utilisant des projections de demandes.

La fonction économique minimise des coûts réels. Des coûts négatifs sont associés aux arcs dont le flot génère des revenus, par exemple des quantités turbinées. Des coûts positifs sont associés aux arcs encourants des dépenses, par exemple des quantités traversant une station de pompage ou de traitement des eaux. Les arcs désignant les demandes comportent des coûts largement négatifs pour contraindre le modèle à les satisfaire. Certains coûts varient de mois en mois, c'est le cas de la demande pour refléter sa fluctuation saisonnière. La différenciation des coûts mensuels est aussi appliquée à la valeur de l'eau emmagasinée selon que le réservoir est en haute ou basse altitude.

Le modèle est utilisé pour simuler divers scénarios de demandes afin d'évaluer la performance du système d'approvisionnement. En cas de défaillance, le modèle peut être utile pour déterminer si elle est causée par l'insuffisance des apports naturels ou parce que la capacité d'un élément a été atteinte.

### 2.4.4 Étude du complexe Oroville (Sabet et Creel, 1991)

Le complexe Oroville constitue une pièce maîtresse de la gestion de la "California State Water Project" (SWP). Situé sur la rivière Feather, le système comprend le lac-réservoir Oroville, la station de pompage-génération Hyatt, le premier réservoir de compensation Thermalito, la station de pompage-génération Thermalito, une station piscicole et le second réservoir de compensation Thermalito. L'exploitation du complexe a pour fins le contrôle de crue, la régularisation des débits de la rivière Feather et la production d'hydroélectricité. De plus, il existe un accord d'échange d'énergie entre la "California Department of Water Resources" (CDWR) et la "South California Edison" (SCE), exprimé en terme de volume d'emmagasinement du second réservoir de compensation Thermalito alloué à la SCE. Les quantités d'énergie revenant à la SCE dépendent donc de l'opération du complexe Oroville. L'étude de ce système est réalisée avec un modèle de simulation composé de 3 modules utilisant chacun la technique OKA.

Le module ORONET: il détermine la stratégie générale d'opération du complexe et calcule les quantités d'eau disponibles pour exportation hors du système. Il cherche à atteindre les valeurs cibles fixées par l'opérateur gestionnaire pour chaque semaine. La fonction économique minimise la somme des coûts associés aux déviations des états cibles: il s'agit de l'emmagasinement de chaque réservoir en fin de semaine, les débits

à garantir dans la rivière et dans la dérivation de la station piscicole, la limitation des débits pour le contrôle des inondations. Ces fonctions de pénalité sont établies par suite d'une calibration du modèle. Elles résultent de compromis sur les priorités d'opération entre les différentes composantes du système. Par exemple, l'arc de diminution du débit garanti dans la rivière est muni d'un coût plus élevé que celui de la diminution de l'emmagasinement cible dans tous les réservoirs. Ainsi le système descendra le niveau de tous les réservoirs avant d'abaisser celui de la rivière.

Le second module OROPRD: ce second module traite de la production énergétique. Il opère sur des périodes journalières ou semi-journalières. Le module calcule l'atteinte d'objectifs cibles tels que la production d'énergie journalière de chaque centrale et les emmagasinements de réservoirs en fin de semaine fixés par ORONET. La fonction économique minimise la somme des pénalités associées aux écarts des productions cibles en énergie, aux déversements et aux écarts de l'emmagasinement cible des réservoirs en fin de semaine.

Le module THANET: ce troisième module calcule la possibilité d'atteindre les obligations contractuelles de fourniture d'énergie de la CDWR à la SCE. La fonction économique prend en compte les écarts des volumes alloués à la SCE et également de ceux alloués à la CDWR en utilisant une relation de partage. Ces déviations sont

pénalisées et le modèle donne la valeur de la fonction économique et les volumes empruntés pour chaque période, aussi bien par la SCE de la CDWR, que vice-versa.

Le modèle global est utilisé pour déterminer la faisabilité de scénarios d'opération du Complexe Oroville.

### 2.4.5 Synthèse des cas d'application

La configuration des systèmes hydriques étudiés comporte plusieurs réservoirs, des stations de pompage, reliés par des canaux ou des segments de rivière. Lorsque la demande est citée, elle est rapportée sous la forme de débits imposés dans des canaux ou des conduites. La complexité de ces systèmes, comportant plusieurs réservoirs à opérer ensemble, fait que les cas d'étude sont surtout orientés vers la recherche de modes d'opération globale des composantes principales du système (réservoirs et canaux les reliant). De ce fait, ces études ne font pas ressortir explicitement l'état de la satisfaction des demandes et la présence de conflits entre elles. Le cas d'application étudié dans le cadre de cette thèse comporte un réservoir dont l'exploitation est à fins multiples. L'analyse de la satisfaction de la demande en est une composante principale. Cette étude impose un niveau minimal de détail à prendre en compte dans l'exploitation du système.

La représentation réseau utilisée dans les cas d'étude présentés ressort deux typologies. Dans la première, un arc désigne une valeur cible (un emmagasinement cible de réservoir, une demande) et est couplé à deux arcs de déviation (une déviation par excès et une par défaut). Dans ce cas, le flot minimal et la capacité de l'arc de la valeur cible sont égaux. Les arcs de déviation ont un flot minimal égal à zéro et une capacité correspondant à une valeur limite imposée. Les déviations sont pénalisées par des coûts dont l'exploitation doit minimiser la somme à travers une fonction économique. Les coûts associés aux déviations sont établis en fonction d'une priorisation de l'allocation aux états cibles.

Dans la seconde typologie, un arc conduit à un point de demande (zone de réservoir) qu'il représente. Il a un flot minimal égal à zéro et une capacité égale à la valeur de la demande. Cette catégorie d'arc n'est pas couplé à un arc de déviation. On lui associe un facteur de priorité compatible (dans l'esprit d'OKA) avec son rang de priorité d'allocation. La fonction économique minimise, alors, la somme des facteurs de priorité associés à chaque unité de flot sur tous les éléments d'exploitation.

Du point de vue de l'algorithme de résolution, ces deux typologies de représentation réseau peuvent être combinées dans le cadre de la modélisation d'un système hydrique. La fonction économique minimise, alors, la somme combinée des pénalités et des facteurs de priorité. C'est ce qui est adopté, au chapitre 3, pour la modélisation

du système hydrique de Kandadji, avec additionnellement, un raffinement de la typologie des arcs utilisés et une définition plus adaptée des arcs de déviation et du mécanisme de priorisation de l'allocation aux différentes demandes du système.

# CHAPITRE III: MODÉLISATION RÉSEAU DU SYSTÈME HYDRIQUE DE KANDADJI POUR FIN D'EXPLOITATION

Ce chapitre est consacré à la modélisation réseau de l'exploitation du système hydrique de Kandadji. Y sont présentées en ordre:

- la description du système et des utilisations de l'eau,
- la topologie réseau que nous proposons pour la modélisation d'un système hydrique,
- la représentation réseau du système de Kandadji et la fonction économique établie pour modéliser l'exploitation de ce système,
- la composition du modèle KANDOKA, développé pour l'exploitation du système, incluant la description des données d'entrée au modèle et son mode d'utilisation.

## 3.1 La description du système et des utilisations de l'eau

La configuration du système hydrique de Kandadji est présentée à la figure 3.1. Les principales composantes physiques du système y sont schématisées.

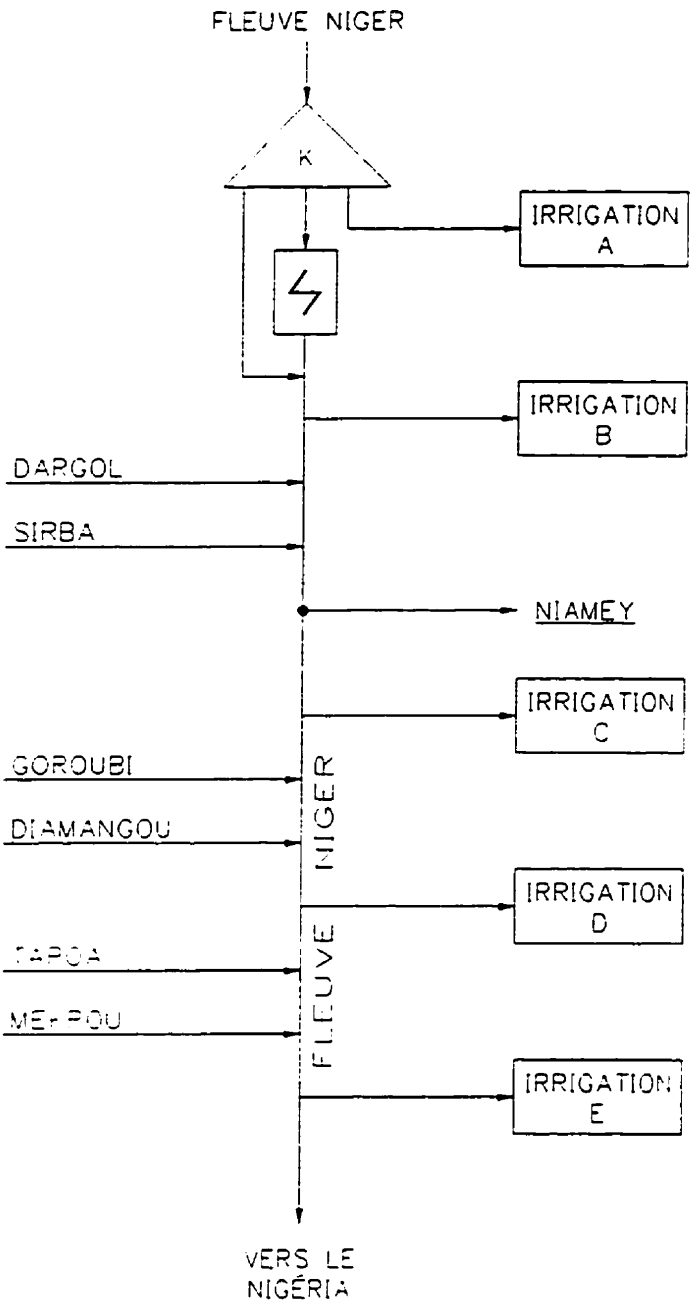



**Figure 3.1: Configuration du système hydrique de Kandadji**

**Le réservoir et ses caractéristiques**

Le tableau 3.1 présente les caractéristiques du réservoir. Le tableau 3.2 donne les caractéristiques de la retenue.

**Tableau 3.1: Caractéristiques du réservoir**

| | |
|---|---|
| cote des plus hautes eaux | 228 m |
| cote des plus basses eaux | 223 m |
| capacité totale | 1420 $hm^3$ |
| réserve utile | 900 $hm^3$ |
| surface totale de la retenue à la cote 228 | 25000 ha |
| évacuateur: 7 pertuis de fond | 600 x 7 = 4200 $m^3/s$ |

**Tableau 3.2: Surface et volume de la retenue**

| Niveau d'eau (m) | Volume ($hm^3$) | Surface (ha) |
|---|---|---|
| 220 | 230 | 7500 |
| 221 | 300 | 9700 |
| 222 | 425 | 11200 |
| 223 | 520 | 12500 |
| 224 | 645 | 14750 |
| 225 | 820 | 17700 |
| 226 | 1000 | 19000 |
| 227 | 1200 | 21250 |
| 228 | 1420 | 25000 |
| 229 | 1700 | 29500 |
| 230 | 2060 | 35500 |
| 231 | 2440 | 42710 |
| 232 | 2920 | 49500 |
| 233 | 3500 | 57000 |
| 234 | 4040 | 63000 |
| 235 | 4720 | 69000 |

**L'usine hydroélectrique**

**Tableau 3.3: Caractéristiques de la centrale hydroélectrique**

| | |
|---|---|
| Puissance totale installée | 25 x 3 = 75 MW |
| Débit d'équipement des turbines | 225 x 3 = 675 $m^3/s$ |
| Hauteur de chute nominale | 13 m |

**Les périmètres irrigués et les autres demandes à l'aval**

L'aménagement des terres irrigables se fera progressivement pour atteindre à long terme une superficie de 140000 hectares, répartis sur cinq périmètres (tableau 3.4). La culture pratiquée est le riz paddy.

**Tableau 3.4: Périmètres irrigués**

| Périmètre | A | B | C | D | E |
|---|---|---|---|---|---|
| Surface (ha) | 34000 | 21295 | 29285 | 9000 | 46430 |

Les prélèvements pour l'irrigation du périmètre A sont effectués par une prise d'eau directement de l'une des digues du barrage.

La régularisation du cours du fleuve sur 500 km doit assurer toute l'année, la satisfaction de la demande en eau pour l'irrigation des périmètres B, C, D, E et les activités domestiques et industrielles de la ville de Niamey. Un débit minimum de 10 $m^3/s$ est imposé à la frontière avec le Nigéria.

**Les affluents**

Les affluents sont des cours d'eau non pérennes et ne coulent que durant la saison des pluies.

Le système est découpé en cinq biefs (figure 3.1). Le bief A comprend le réservoir, la centrale hydroélectrique et le périmètre A. Le bief B contient le périmètre B et s'étend du voisinage immédiat du barrage jusqu'à la limite amont de la confluence du Dargol. Le bief C s'étend de la confluence du Dargol jusqu'à la limite amont de celle du Goroubi et comprend la ville de Niamey et le périmètre C. Le bief D comprend le périmètre D et s'étend de la confluence du Goroubi jusqu'à la limite amont de celle de la Tapoa. Le périmètre E est contenu dans le bief E qui s'étend de la confluence de la Tapoa jusqu'à la frontière avec le Nigéria.

**Hydrométrie du fleuve Niger à Kandadji**

Le système hydrique est situé dans une zone climatique (Sahel) à forte évaporation et à faible pluviométrie (300 à 700 mm par an). Les pertes d'eau par évaporation peuvent atteindre 50% de la réserve utile sur certaines retenues (Prashar et Berrada, 1992).

La station hydrométrique de Kandadji est assez récente puisque les données disponibles à cet endroit ne couvrent que la période 1978-1995. Les données hydrométriques montrent que le débit du fleuve varie très fortement à l'intérieur de l'année puisqu'il peut descendre de 2000 $m^3/s$ en décembre-janvier, à quelques dizaines de $m^3/s$ en juin-juillet (période d'étiage). L'hydrogramme des apports à Kandadji présente une crue étalée, mais pas brutale, résultant de l'amortissement dans la Cuvette Lacustre en amont du Niger Moyen (Brunet-Moret et al, 1986). La crue observée en décembre-janvier vient de la contribution du bassin du Niger Supérieur.

La figure 3.2 présente des apports hebdomadaires observés sur plusieurs années à Kandadji. Elle montre que les apports naturels du fleuve Niger dans la décrue de l'hydrogramme se confondent à toutes fins pratiques en année de forte hydraulicité comme en année de faible hydraulicité.

On a souvent rapporté dans la littérature, "l'anomalie du fleuve Niger" pour caractériser les déficits chroniques que connaît ce cours d'eau. Au Sahel, l'anomalie des précipitations continue à être négative depuis les années 1970 (Nicholson et al, 1988;

Mahe et Olivry, 1995). La conséquence de ce déficit chronique sur les cours d'eau sahéliens, et plus particulièrement sur le Niger Moyen, est la diminution continue des débits dépassant en proportion celle observée au niveau des précipitations (Mahe et Olivry, 1995; Sircoulon, 1990; Billon, 1985). En exemple, au cours de la dernière décennie, le déficit de pluie à Koulikoro au Mali est de 20% et les lames écoulées sont plus faibles de près de 50%. Cette différence est sans doute reliée à une diminution des caractéristiques d'écoulement des sols avec la variation des précipitations et aussi à un changement des relations rivières-nappes.

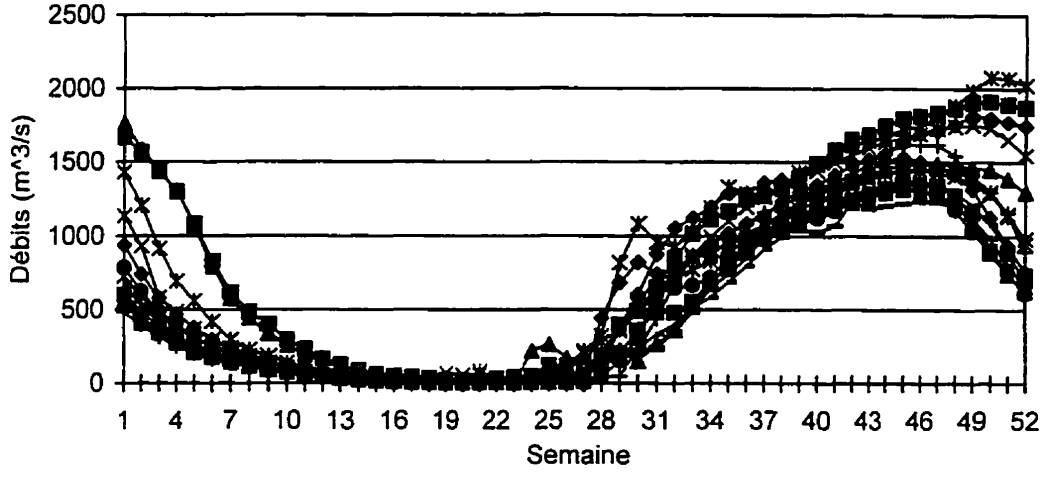



**Figure 3.2 : Apports hebdomadaires des années 1978 à 1994 à Kandadji**

Il faut remarquer que l'année 1995 a été largement excédentaire en hauteur de pluie, peut-être un signe de retour à la normale climatique au Sahel? Il est par contre très difficile de prévoir actuellement quelle serait l'évolution du climat au Sahel, et son influence pour une amélioration des apports aux cours d'eau, compte tenu de la

complexité des variables mises en jeu et surtout du manque de données précises au Sahel utilisables par les modèles de circulations générales atmosphériques.

L'exploitation du système doit rencontrer les objectifs suivants:

(1) maintenir le mieux possible l'emmagasinement dans la zone spécifiée sur la période d'analyse;

(2) minimiser les débits déversés;

(3) minimiser le déficit sur la demande d'énergie;

(4) minimiser l'impact des déficits sur la production agricole;

(5) minimiser le déficit sur la demande en eau de la ville de Niamey;

(6) minimiser le déficit sur le débit réservé;

(7) minimiser le dépassement du débit réservé.

## 3.2 Modélisation réseau de l'exploitation d'un système hydrique

Cette section présente la topologie réseau développée pour modéliser l'exploitation d'un système hydrique. Pour les besoins de cette modélisation, on considère deux types de noeuds et sept catégories d'arcs.

### 3.2.1 Types de noeuds

On distingue deux types de noeud.

#### 3.2.1.1 Noeud périphérique

Le noeud périphérique est un noeud d'approvisionnement (source) ou de demande (puits). Lorsqu'il représente un point de demande, sa capacité est imposée par l'arc qui lui est directement adjacent. Lorsqu'il représente un approvisionnement, c'est l'inverse.

#### 3.2.1.2 Noeud intérieur

Ce noeud sans capacité modélise l'équation de continuité. En un noeud intérieur, il n'y a pas de stockage d'eau.

### 3.2.2 Types d'arc

On définit sept arcs élémentaires qui peuvent se combiner pour représenter les fonctions de base d'un système hydrique.

#### 3.2.2.1 Arc d'apport

Cet arc relie un noeud périphérique à un noeud intérieur. Comme le noeud périphérique a une capacité, le flot minimum d'un arc d'apport est égal à sa capacité et a un coût nul.

#### 3.2.2.2 Arc de demande cible

L'arc de demande cible relie souvent un noeud intérieur à un autre noeud intérieur directement relié à un noeud périphérique représentant la localisation d'une demande. Il correspond à une contrainte d'égalité et a un coût nul. Son flot minimum et sa capacité sont égaux à la valeur effective de la demande.

#### 3.2.2.3 Arc de surplus

À l'arc de demande cible, il est possible de coupler un second arc dit de **surplus**. Ces deux arcs sont supportés par les mêmes noeuds et ont la même direction avec une différence dans la définition des paramètres. En effet, l'arc de surplus comporte un flot minimum égal à zéro avec sa capacité égale à la valeur maximale admise du surplus. Le coût associé à cet arc est fonction de l'interprétation faite de ce surplus.

#### 3.2.2.4 Arc de déficit

L'arc de déficit est supporté par les mêmes noeuds que celui de la demande, mais il est de direction opposée. Son flot minimum est zéro. Sa capacité correspond à la grandeur du type de déficit sur la demande effective et ne peut dépasser la valeur de cette dernière. Il a un coût positif.

#### 3.2.2.5 Arc de l'allocation effective

Ce type d'arc relie un noeud intérieur à un noeud périphérique représentant la localisation d'une demande. Son flot minimum est zéro et sa capacité est au moins égale à la demande. Son coût est nul car c'est un arc résultant.

#### 3.2.2.6 Arc transiteur

Cet arc relie deux noeuds intérieurs et représente souvent le transfert de flot entre deux régions du réseau. Dans ce cas, son flot minimum est zéro et sa capacité correspond aux contraintes physiques de cette partie du système. Il peut arriver qu'une contrainte opérationnelle ou correspondant à une demande soit associée à un arc transiteur. Il aura donc un flot minimum égal à cette demande et une capacité déterminée par les limites physiques du système. Un arc transiteur a un coût nul.

#### 3.2.2.7 Arc particulier

C'est un arc de surplus et n'être couplé à aucune demande ou un arc transiteur dont le coût n'est pas nul.

### 3.2.3 Représentation réseau d'un système hydrique

La section précédente a présenté la typologie des arcs que nous proposons pour représenter les éléments d'un système hydrique. La présente section montre comment utiliser ces arcs pour modéliser les composantes d'exploitation. La question des coefficients de pénalité ou de facteurs de priorité n'est pas abordée dans cette section. L'établissement de ces paramètres est propre à chaque système en fonction de ses dispositions opérationnelles et de la priorisation des différents éléments d'exploitation. L'application à la modélisation de l'exploitation du système hydrique de Kandadji constitue un exemple d'établissement de ces coefficients.

### 3.2.3.1 Réservoir d'emmagasinement

**a) Sans niveau cible**

Chaque zone du réservoir est représentée par un arc particulier dont la capacité est le volume de la zone. On établit une priorisation des zones en affectant un facteur qui croît des zones inférieures vers les zones supérieures du réservoir. L'emmagasinement résultant est désigné par un arc d'allocation effective dont la capacité est le volume maximal du réservoir.

**b) Avec niveau cible**

L'emmagasinement cible est désigné par un arc de demande cible. On lui adjoint des arcs de surplus et de déficit dépendamment du nombre de zones du réservoir. À chaque zone située au-dessus du niveau cible correspond un arc de surplus dont la capacité est égale au volume de la zone. À chaque zone située en-dessous du niveau cible correspond un arc de déficit dont la capacité est égale au volume de la zone. Le niveau cible subdivise la zone, dans laquelle il se trouve, en deux sous-zones. Elles sont, alors, représentées de la même façon que les zones principales.

**c) Avec zone cible**

Lorsqu'une zone opérationnelle est choisie parmi les zones du réservoir, elle devient une zone cible. Elle est désignée par un arc particulier dont le flot minimal est égal au volume total des zones d'en dessous, et dont la capacité est égale au flot minimal majoré du volume de la zone cible. À l'arc de la zone cible, on adjoint des arcs de surplus et de déficit. Un arc de déficit représente une zone en-dessous de la zone cible. Chaque arc de surplus désigne une zone en-dessus de la zone cible.

### 3.2.3.2 Production hydroélectrique

**a) Avec demande cible**

Lorsqu'elle est visée la demande d'énergie est représentée par un arc de demande cible. Cet arc est couplé à des arcs de surplus et de déficit. Le nombre et la capacité des arcs de surplus et de déficit dépendent de la subdivision des surplus et des déficits en fonction de leur impact.

**b) Avec demande minimale**

En présence d'une demande minimale à atteindre, la production d'énergie est représentée par un arc particulier dont le flot minimal correspond à cette demande minimale et dont la capacité équivaut à la production maximale d'énergie. On lui adjoint un arc de déficit dont la capacité est égale à une valeur permise.

#### 3.2.3.3 Déversement

Il est modélisé par un arc particulier dont la capacité est égale à celle de l'évacuateur.

#### 3.2.3.4 Segment de cours d'eau (de canal ou de conduite)

**a) Avec débit cible**

Le débit visé est représenté par un arc de demande cible. Il est couplé à des arcs de surplus ou de déficit dont les capacités sont des valeurs permises ou fixées par les caractéristiques physiques du cours d'eau (du canal ou de la conduite).

**b) Avec débit minimal ou maximal imposé**

Il est alors modélisé par un arc particulier dont le flot minimal correspond au débit minimal et dont le flot maximal correspond à la capacité d'écoulement ou au débit maximal permis ou imposé.

### 3.2.3.5 Station de pompage (de purification ou d'épuration)

Une station de pompage (de purification ou d'épuration) est représentée par un arc de zone cible couplé à un arc de déficit. Le flot minimal de l'arc de zone cible est égale au débit minimal à pomper (à purifier ou à épurer) et sa capacité est celle de la station. La capacité de l'arc de déficit correspond au débit minimal à pomper (à purifier ou à épurer).

### 3.2.3.6 Autres utilisations de l'eau (municipale, agricole, industrielle)

**a) Avec demande cible**

On utilise un arc de demande cible auquel on adjoint des arcs de surplus et de déficit dont les capacités sont des valeurs permises.

**b) Avec demande minimale**

La demande minimale agit comme une contrainte et équivaut au flot minimal sur l'arc représentant cette utilisation. C'est un arc particulier dont la capacité est égale à la demande maximale.

#### 3.2.3.7 Transfert d'une période à l'autre

Dans l'exploitation du système hydrique, seul l'emmagasinement du réservoir est transporté d'une période à la suivante. Il assure le transfert d'une période à l'autre sous la forme d'un arc particulier. Cet arc est comme un arc d'allocation effective à la différence que le noeud d'arrivée n'est pas un noeud périphérique. C'est le noeud représentant la continuité du flot au réservoir durant la période suivante.

## 3.3 Modélisation réseau de l'exploitation du système Kandadji

Cette section décrit les modules noeud-arc utilisés pour représenter un réservoir, un bief avec ses apports et ses demandes et le passage d'une période à la suivante. Elle présente la fonction économique et énumère les données d'entrée à ce modèle de l'exploitation du système hydrique de Kandadji.

### 3.3.1 Le réseau du système de Kandadji

Les composantes du système hydrique sont représentées par des noeuds et des arcs dont l'assemblage forme le réseau de la figure 3.3.

Chaque arc représente le transfert d'un volume d'eau durant une période (hebdomadaire). Les arcs de déficit sont introduits pour permettre une non satisfaction de la demande et augmenter la flexibilité de l'exploitation du système en contexte de pénurie. La définition de chaque arc est donnée aux tableaux 3.5 à 3.9. Le flot minimal et la capacité de l'arc sont donnés au tableau 3.10. Le système est découpé en cinq biefs.

**Le bief A**

Le réservoir et son équation de conservation de flot sont désignés par le noeud 6 et tous les arcs qui lui sont incidents. L'emmagasinement du réservoir est désigné par un arc de zone cible (réserve utile constituant la zone d'exploitation), couplée à un arc de déficit et à un arc de surplus. La réserve utile est représentée par une zone cible permettant la fluctuation du niveau du réservoir en regard du pas de temps considéré (semaine) pour l'exploitation du système. Le flot minimal sur l'arc de la zone cible correspond au volume sous la cote minimale d'exploitation du réservoir. Le flot maximal sur cet arc est

le volume stocké à la cote maximale d'exploitation. L'arc de déficit correspond à une descente du niveau du réservoir en-dessous de la cote minimale d'exploitation. L'arc de surplus de l'emmagasinement n'est pas activé en période de faible hydraulicité. Sa capacité est fixée en fonction des conditions d'exploitation. Un arc d'allocation effective est utilisé pour représenter l'emmagasinement résultant en fin de période.

En particulier, on impose un flot minimal sur cet arc (seulement à la dernière période) pour viser un **emmagasinement cible** en fin de saison d'exploitation. Le noeud 21 représente la centrale hydroélectrique. La production d'énergie et l'irrigation au périmètre A sont représentées sous le schéma "avec demande cible". En particulier, pour l'irrigation, on considère trois arcs de déficit: le premier arc représente un déficit acceptable, provoquant seulement un stress minime chez la culture; le second représente un déficit qui cause une réduction significative de la productivité de la plante et qui est moyennement pénalisé; le dernier arc modélise le déficit fatal à la culture et est à forte pénalité.

**Le bief B**

Il est désigné par le noeud 7 et les arcs qui lui sont connectés. Le périmètre B est représenté sous le schéma "avec demande cible". Il n'y a pas de flot minimal imposé sur l'arc de transfert du bief B au bief C.

**Le bief C**

Il est désigné par le noeud 9 et tous les arcs qui lui sont incidents. L'approvisionnement de la ville de Niamey et l'irrigation au périmètre C sont introduits sous le schéma "avec demande cible".

**Le bief D**

Il est désigné par le noeud 13 et tous les arcs qui lui sont incidents. L'irrigation au périmètre D a la même représentation réseau que les périmètres en amont.

**Le bief E**

Le noeud 16 et ses arcs représentent le bief E. Le périmètre E est représenté comme les périmètres en amont. Le débit réservé au Nigéria est sous le schéma "avec demande cible".

**Tableau 3.5: Définition des arcs du bief A**

| Arc | Définition |
|---|---|
| 2-6 | apports naturels au réservoir |
| 1-6 | emmagasinement initial |
| 6-3 | violation de l'emmagasinement maximal |
| 6-4 | perte par évaporation |
| 6-5 | demande d'irrigation du périmètre A |
| 6-5 | dépassement de la demande d'irrigation du périmètre A |
| 5-6 | déficit acceptable sur la demande du périmètre A |
| 5-6 | déficit à pénalité moyenne sur la demande du périmètre A |
| 5-6 | déficit fatal sur la demande du périmètre A |
| 5-0A | allocation effective au périmètre A |
| 6-21 | débits turbinés |
| 6-21 | dépassement de la demande d'énergie |
| 21-6 | déficit sur la demande d'énergie |
| 6-7 | débits déversés |
| 21-7 | débits restitués par la centrale hydroélectrique |
| 6-20 | emmagasinement: zone d'exploitation (zone cible) |
| 6-20 | dépassement de la zone d'exploitation |
| 20-6 | déficit sur l'emmagasinement minimal d'exploitation |
| 20-6* | emmagasinement en fin de période |

**Tableau 3.6: Définition des arcs du bief B**

| Arc | Définition |
|---|---|
| 7-8 | demande d'irrigation du périmètre B |
| 7-8 | dépassement de la demande d'irrigation du périmètre B |
| 8-7 | déficit acceptable sur la demande du périmètre B |
| 8-7 | déficit à pénalité moyenne sur la demande du périmètre B |
| 8-7 | déficit fatal sur la demande du périmètre B |
| 8-0B | allocation effective au périmètre B |
| 7-9 | débits transférés du bief B au bief C |

**Tableau 3.7: Définition des arcs du bief C**

| Arc | Définition |
|---|---|
| 10-9 | apports Dargol et Sirba |
| 9-11 | demande en eau ville de Niamey |
| 9-11 | dépassement de la demande en eau de Niamey |
| 11-9 | déficit sur la demande en eau de Niamey |
| 11-0N | allocation effective à la ville de Niamey |
| 9-12 | demande d'irrigation du périmètre C |
| 9-12 | dépassement de la demande d'irrigation du périmètre C |
| 12-9 | déficit acceptable sur la demande du périmètre C |
| 12-9 | déficit à pénalité moyenne sur la demande du périmètre C |
| 12-9 | déficit fatal sur la demande du périmètre C |
| 9-0C | allocation effective au périmètre C |
| 9-13 | débits transférés du bief C au bief D |

**Tableau 3.8: Définition des arcs du bief D**

| Arc | Définition |
|---|---|
| 14-13 | apports Goroubi et Diamangou |
| 13-15 | demande d'irrigation du périmètre D |
| 13-15 | dépassement de la demande d'irrigation du périmètre D |
| 15-13 | déficit acceptable sur la demande du périmètre D |
| 15-13 | déficit à pénalité moyenne sur la demande du périmètre D |
| 15-13 | déficit fatal sur la demande du périmètre D |
| 15-0D | allocation effective au périmètre D |
| 13-16 | débits transférés du bief D au bief E |

**Tableau 3.9: Définition des arcs du bief E**

| Arc | Définition |
|---|---|
| 17-16 | apports Tapoa et Mékrou |
| 16-18 | demande d'irrigation du périmètre E |
| 16-18 | dépassement de la demande d'irrigation du périmètre E |
| 18-16 | déficit acceptable sur la demande du périmètre E |
| 18-16 | déficit à pénalité moyenne sur la demande du périmètre E |
| 18-16 | déficit fatal sur la demande du périmètre E |
| 18-0E | allocation effective au périmètre E |
| 16-19 | débit réservé à la frontière |
| 16-19 | dépassement du débit réservé à la frontière |
| 19-16 | déficit sur le débit réservé |
| 19-22 | débits effectifs transférés au Nigéria |

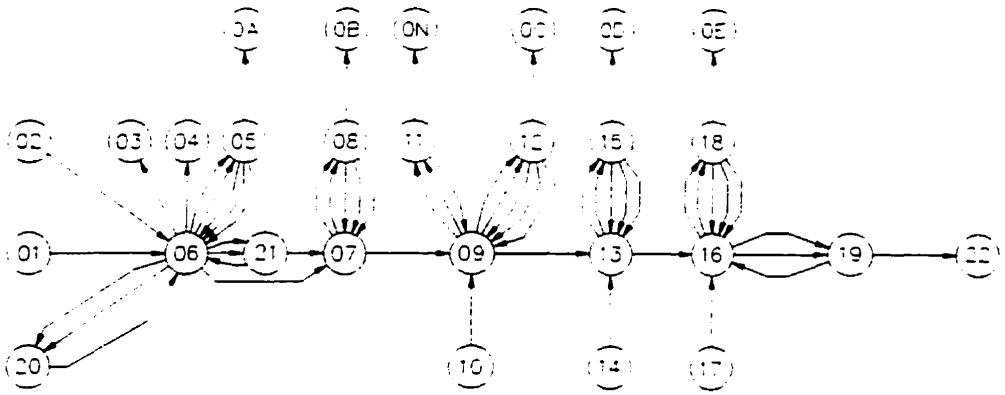



**Figure 3.3: Réseau planaire du système hydrique de Kandadji**

Du point de vue de la représentation spatiale du système, ce réseau comporte assez de détails pour permettre une étude adéquate de l'exploitation du système. Pour tenir compte de l'aspect temporel de l'exploitation du système, il faut procéder à l'expansion du réseau ci-dessus défini. La dimension temps est introduite dans la modélisation en connectant les représentations spatiales individuelles entre elles par le transfert de l'emmagasinement du réservoir entre deux périodes successives. En définitive, la représentation spatio-temporelle du système est donnée par le réseau étagé à la figure 3.4, dont chaque niveau représente les activités d'exploitation du système durant une période de temps. Deux niveaux successifs sont reliés par un arc (20-6*) représentant l'emmagasinement du réservoir transporté d'une période à la suivante. Le nombre de niveaux dans le réseau étagé correspond au nombre de périodes de l'horizon décisionnel.

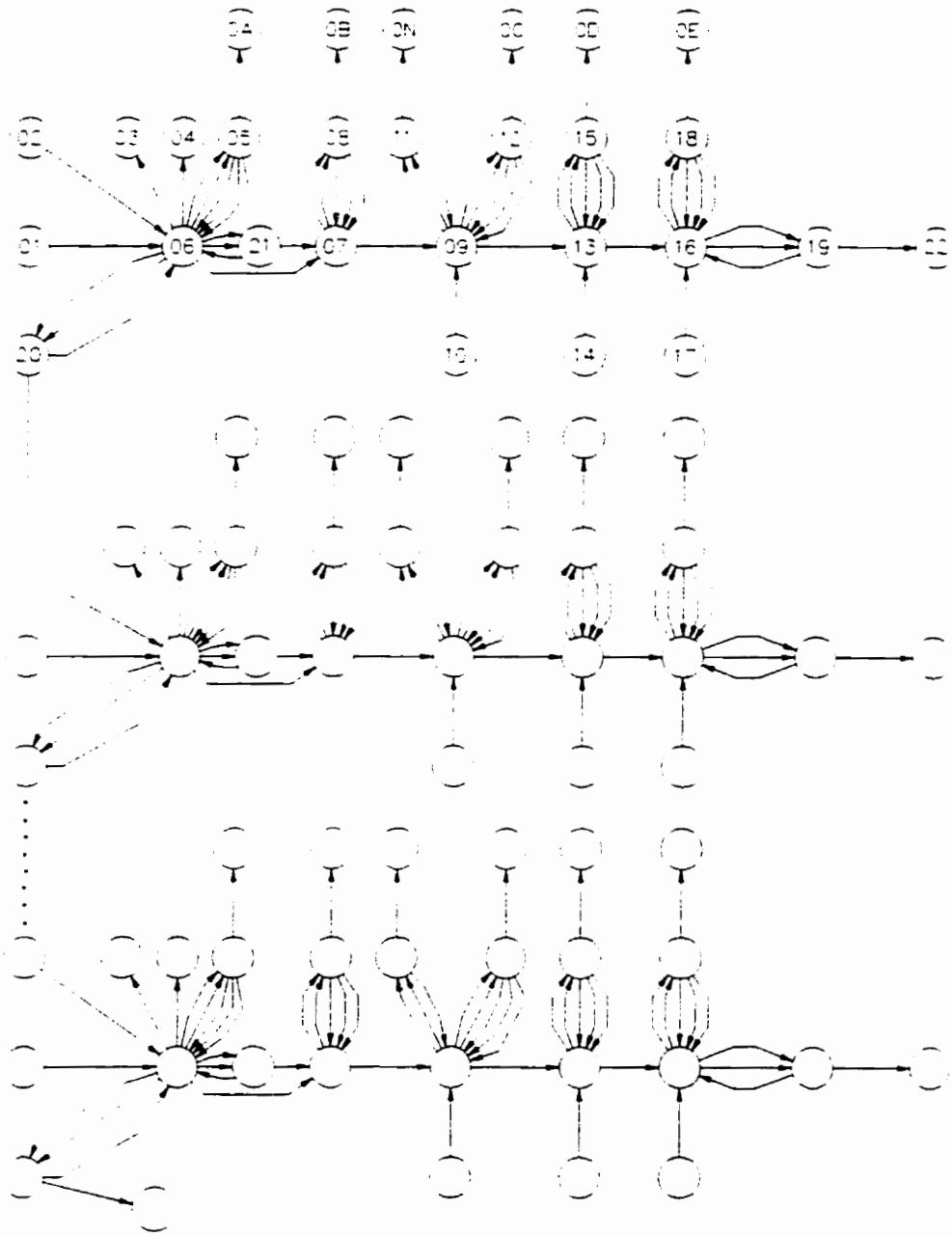


**Figure 3.4: Réseau multipériodique de Kandadji**

### 3.3.2 La fonction économique

Elle minimise une fonction des déficits et des surplus, ceux-ci étant associés à des fonctions de pénalités. Elle s'écrit:

$$\text{Min } Z = \sum_{t=1}^{T} (C_{ijt} \cdot \text{SURPLUS}_{ijt} + Cd_{ijt} \cdot \text{DÉFICIT}_{ijt} + Co_{ijt} \cdot \text{DISPO}_{ijt}) \qquad (3.1)$$

où: ij: indice séquentiel identifiant un arc (i,j)

t: indice de la période

T: nombre de périodes de l'horizon d'exploitation

SURPLUS: valeur du surplus (variable de décision)

DÉFICIT: valeur du déficit (variable de décision)

DISPO: violation d'une disposition opérationnelle

C: pénalité affectée au surplus

Cd: pénalité affectée au déficit

Co: pénalité affectée à la violation d'une disposition opérationnelle

Les objectifs d'exploitation du système ont été énoncés à la section 3.1. L'objectif 1 est représenté dans la fonction économique en minimisant le dépassement de la zone d'exploitation (zone cible) et le déficit sur l'emmagasinement minimal d'exploitation.

Ceci vise à maintenir le niveau du réservoir à l'intérieur de la zone cible constituée par la réserve utile. L'atteinte du niveau minimal d'exploitation n'entraîne aucun coût. L'objectif 2 y est modélisé en pénalisant les débits déversés, contribuant à turbiner la plus grande partie des débits sollicités à l'aval. Le dépassement de la zone cible a une pénalité plus grande que les débits déversés pour assurer qu'un déversement d'eau se produira avant de dépasser la zone cible. Les objectifs 6 et 7 sont représentés dans la fonction économique en minimisant la déviation de part et d'autre du débit réservé à la frontière. Les objectifs 3, 4 et 5 sont modélisés en assignant une pénalité au déficit sur la satisfaction de la demande.

La plupart des arcs de surplus ne sont pas activés durant l'exploitation en période de basse hydraulicité. Dans ce cas, il ne contribue pas à la fonction économique.

Les pénalités sur les déficits sont définies à travers un vecteur de coefficients appliqué au modèle. Ce vecteur tient compte de la priorisation de l'allocation entre les demandes et de la distinction des conséquences des différents types de déficit.

La fonction économique incorpore également des coûts traduisant des dispositions opérationnelles des composantes du système. Elle minimise la somme de tous ces coûts et celle de toutes les pénalités.

**Tableau 3.10: Contraintes de flot dans les arcs**

| Type d'arc | Flot minimum ($m^3$) | Capacité ($m^3$) |
|---|---|---|
| apport | valeur donnée | = flot minimum |
| emmagasinement initial | valeur fixée au départ | = flot minimum |
| violation emmagasinement | 0 | $500x10^6$ |
| évaporation | valeur déterminée | =flot minimum |
| toute demande | valeur de la demande | =flot minimum |
| dépassement irrigation | 0 | valeur du dépassement permis |
| déficit 1 d'irrigation | 0 | 20% de la demande |
| déficit 2 d'irrigation | 0 | 20% de la demande |
| déficit 3 d'irrigation | 0 | 60% de la demande |
| demande d'énergie | valeur de la demande | =flot minimum |
| surplus d'énergie | 0 | valeur du surplus permis |
| déficit d'énergie | 0 | valeur de la demande |
| débits déversés | 0 | capacité de l'évacuateur |
| débits restitués par la centrale | 0 | débit d'équipement de la centrale |
| emmagasinement: zone cible | volume minimal d'exploitation | volume maximal d'exploitation |
| dépassement de la zone cible | 0 | volume de la zone de dépassement |
| déficit emmagasinement | 0 | $520x10^6$ |
| emmagasinement final | 0 | emmagasinement maximal |
| débits transférés de bief en bief | 0 | crue de projet ou un gros débit |
| déficit Niamey | 0 | 10% de la demande |
| dépassement du débit réservé | 0 | crue de projet -débit réservé |
| déficit débit réservé | 0 | valeur du débit réservé |
| tout arc résultant | 0 | valeur maximale de la demande |

**Les contraintes**

La fonction économique (équation 3.1) est sujette aux contraintes de conservation du flot aux noeuds, et de flot minimum et de la capacité des arcs. En d'autres termes, la conservation du flot aux noeuds est reflétée par les équations de continuité au réservoir et dans les différents biefs, tandis que le flot minimum et la capacité d'un arc sont justifiés, soit par les contraintes physiques des ouvrages du système, soit par la demande et les consignes d'exploitation. Les contraintes du flot minimum et de capacité des arcs sont définies dans le tableau 3.10.

## 3.4 Le modèle KANDOKA

KANDOKA est conçu pour l'étude de l'exploitation du système hydrique de Kandadji. Il comprend deux procédures principales tournées sur un ordinateur central qui utilise le système d'exploitation MUSIC et le système de traitement par lot MVS.

### 3.4.1 La procédure NETFLOW

La version 5.18 de SAS/OR (SAS Institute, 1985) contient une procédure de programmation mathématique de flot en réseau. Cette procédure appelée NETFLOW est

un code de l'algorithme OKA programmé en langage SAS. La configuration du réseau lui est soumise sous la forme d'une matrice contenant les coordonnées, les paramètres et la nature de chaque arc. NETFLOW insère le réseau soumis dans une circulation équivalente, en créant un noeud virtuel auquel il relie tous les noeuds périphériques par des arcs artificiels; il faut réaliser que dans la procédure NETFLOW, le noeud virtuel créé représente à la fois le noeud d'entrée et celui de sortie du réseau de circulation. Ensuite, NETFLOW génère les potentiels nodaux ($\Pi_i$, $\Pi_j$) et résout la fonction économique. La solution optimale est donnée sous la forme d'un vecteur de flots dans tous les arcs. Ce vecteur de flot est muni de la valeur optimale de la fonction économique et de coûts marginaux, qui ne sont autres que les coûts réduits ($d_{ij}$). Dans le cas échéant, la procédure annonce l'absence de solution faisable.

### 3.4.2 Le générateur du réseau

À chaque calcul de l'exploitation du réservoir correspond une matrice donnée avec des paramètres d'arc différents. Cette matrice est créée par la procédure GENER. C'est un programme Fortran assez modulaire, conçu pour générer la configuration du réseau de Kandadji ou de tout autre réseau par simple modification du code. Pour chaque arc du réseau spatial, existe une sous-procédure de génération d'une carte contenant les coordonnées, les paramètres et la nature de l'arc. Les données d'exploitation sont

structurées en matrices soumises à GENER dans un seul fichier. Ces matrices contiennent les données suivantes:

. le nombre de périodes d'exploitation

. les contraintes physiques et opérationnelles du système

. l'emmagasinement initial

. l'emmagasinement minimal et l'emmagasinement maximal d'exploitation

. les apports naturels au système et l'évaporation du réservoir sous forme de débits

. la demande en eau et en énergie sous forme de débits

. les différents types de déficit et leur pénalité en fonction de la grandeur et de la période d'apparition

. les surplus ou dépassements possibles avec leur coût

. l'identification des noeuds

Avec ces données d'entrée au modèle, GENER construit la configuration du réseau. Elle peut être affichée pour permettre une vérification avant la soumission à NETFLOW, ou tout simplement soumise directement par une carte de contrôle de traitement par lot.

### 3.4.3 Images de cartes

Les tableaux suivants sont des exemples d'images de cartes des arcs élémentaires définis en 3.2.1. Ces images de cartes sont particulières à la procédure NETFLOW de

SAS/OR. Leur lecture par OKA est en format libre. Le coût du flot transitant sur un arc est en faux dollars.

**Tableau 3.11: Exemple de représentation d'un arc d'apport**

| Arc | Coût $ | Flot minimum ($m^3$) | Capacité ($m^3$) | Apport ($m^3$) | Demande ($m^3$) |
|---|---|---|---|---|---|
| i-j | 0 | 264000 | 264000 | 0 | . |

**Tableau 3.12: Exemple de représentation d'un arc de demande cible**

| Arc | Coût $ | Flot minimum ($m^3$) | Capacité ($m^3$) | Apport ($m^3$) | Demande ($m^3$) |
|---|---|---|---|---|---|
| i-j | 0 | 287000 | 287000 | . | . |

**Tableau 3.13: Exemple de représentation d'un arc de surplus**

| Arc | Coût $ | Flot minimum ($m^3$) | Capacité ($m^3$) | Apport ($m^3$) | Demande ($m^3$) |
|---|---|---|---|---|---|
| i-j | 25 | 0 | 43050 | . | . |

**Tableau 3.14: Exemple de représentation d'un arc de déficit**

| Arc | Coût $ | Flot minimum ($m^3$) | Capacité ($m^3$) | Apport ($m^3$) | Demande ($m^3$) |
|---|---|---|---|---|---|
| i-j | 50 | 0 | 1000 | . | . |

**Tableau 3.15: Exemple de représentation d'un arc de l'allocation effective**

| Arc | Coût $ | Flot minimum ($m^3$) | Capacité ($m^3$) | Apport ($m^3$) | Demande ($m^3$) |
|---|---|---|---|---|---|
| i-j | 0 | 0 | 287000 | . | 0 |

**Tableau 3.16: Exemple de représentation d'un arc transiteur**

| Arc | Coût $ | Flot minimum ($m^3$) | Capacité ($m^3$) | Apport ($m^3$) | Demande ($m^3$) |
|---|---|---|---|---|---|
| i-j | 0 | 0 | 2540160000 | . | . |

**Tableau 3.17: Exemple de représentation d'un arc transiteur muni d'une contrainte**

| Arc | Coût $ | Flot minimum ($m^3$) | Capacité ($m^3$) | Apport ($m^3$) | Demande ($m^3$) |
|---|---|---|---|---|---|
| i-j | 0 | 6048000 | 2540160000 | . | . |

**Tableau 3.18: Exemple de représentation d'un arc particulier**

| Arc | Coût $ | Flot minimum ($m^3$) | Capacité ($m^3$) | Apport ($m^3$) | Demande ($m^3$) |
|---|---|---|---|---|---|
| i-j | 2000 | 0 | 500000000 | . | . |

**Tableau 3.19: Autre exemple de représentation d'un arc particulier**

| Arc | Coût $ | Flot minimum ($m^3$) | Capacité ($m^3$) | Apport ($m^3$) | Demande ($m^3$) |
|---|---|---|---|---|---|
| i-j | 400 | 0 | 2000000000 | . | . |

### 3.4.4 Application sur une période

Le modèle utilise le réseau spatial du système. L'arc résultant de l'emmagasinement du réservoir en fin de période et celui qui résulte des débits transités au Nigéria sont des

arcs périphériques qui doivent prendre le statut "DEMANDE" avec la valeur "0" (tableau 3.20). C'est une contrainte non limitative qui sert à assurer la structure du réseau de circulation pour éviter un dysfonctionnement de l'algorithme OKA. Autrement, le modèle annoncerait "non faisable", que le problème n'aurait pas de solution faisable.

**Tableau 3.20: Représentation de l'arc de l'emmagasinement et de celui du débit transféré au Nigéria sur une période**

| Arc | Coût $ | Flot minimum ($m^3$) | Capacité ($m^3$) | Apport ($m^3$) | Demande ($m^3$) |
|---|---|---|---|---|---|
| 20-6* | 0 | 0 | 1420000000 | . | 0 |
| 19-22 | 0 | 0 | 2540160000 | . | 0 |

### 3.4.5 Application sur plusieurs périodes

Le modèle utilise le réseau spatio-temporel de l'exploitation du système. L'arc résultant de l'emmagasinement du réservoir à la fin de chaque période devient un arc transiteur et ne peut être mis sous le statut "DEMANDE" à l'exception de celui à la fin de l'horizon considéré. Tous les autres arcs qui sont périphériques dans le réseau spatial conservent le même statut dans le réseau spatio-temporel.

## 3.5 Conclusion

Cette formulation modélise l'exploitation d'un système hydrique sur une ou plusieurs périodes, les déficits et les surplus constituant des critères d'optimisation. Le choix des coefficients de pénalité est déterminant dans l'établissement des demandes qui seront satisfaites en période de pénurie. Cette question est abordée au chapitre 4.

# CHAPITRE IV: QUELQUES ÉTUDES RÉALISÉES AVEC KANDOKA

## 4.1 Introduction

Dans l'exploitation du réservoir, la saison sèche constitue la période où le système est plus exposé à la pénurie. Les études effectuées ont un double objectif, celui de valider la formulation réseau de l'exploitation du système et celui d'identifier les caractéristiques spécifiques (de celles plus générales) à l'exploitation du système de Kandadji, dont l'influence des vecteurs de pénalité sur la satisfaction des demandes imposées au système. Son comportement est étudié pour trois vecteurs de coefficients de pénalité sur les déficits. Ceci permet d'identifier le vecteur représentant le meilleur compromis en regard des niveaux de satisfaction des différentes demandes. On cherche également à déterminer la sensibilité des résultats à une variation des apports au réservoir, à une réduction de l'emmagasinement en début de saison sèche et à la non spécification d'un emmagasinement cible à la fin de la saison sèche. L'influence du débit réservé sur la satisfaction des autres demandes du système est aussi étudiée pour en déterminer la valeur limite en fonction de l'hydraulicité.

## 4.2 Scénario de base

On définit un scénario de base pour

1) évaluer la formulation réseau de l'exploitation d'un système hydrique;

2) étudier le comportement du système exploité pour divers ensembles de coefficients de pénalité imposés aux déficits;

3) dégager les caractéristiques propres au système de Kandadji de celles plus communes aux systèmes hydriques construits en régions climatiques sahéliennes.

Le scénario choisi permet l'étude de l'exploitation du système en saison sèche sous des séquences synthétiques d'apports naturels descriptives des années d'hydraulicité moyenne ou sèche. Les demandes en eau imposées dans le scénario de base sont celles imparties au système au terme des avant-projets de Kandadji (SOFRELEC, 1980). Les données d'entrée au modèle KANDOKA définies sur une base hebdomadaire comprennent l'évaporation du réservoir, les volumes d'eau pour la production hydroélectrique, l'alimentation en eau de la ville de Niamey, l'irrigation des périmètres en culture. Les transferts d'eau réservés au Nigéria sont aussi définis hebdomadairement. Finalement, l'état initial de l'emmagasinement du réservoir doit être fourni au modèle.

### 4.2.1 Les apports au réservoir

On utilise les apports moyens hebdomadaires obtenus à partir des données journalières moyennes du 21 janvier au 28 juillet des années 1978 à 1995 (MAMADOU ABDOU, 1995). C'est dans cet intervalle de temps que se chevauchent la campagne sèche de culture et la décroissance des débits du fleuve Niger à Kandadji. Deux apports caractéristiques ont été choisis pour l'étude de l'exploitation du système hydrique: une année moyenne et une année sèche (figure 4.1).

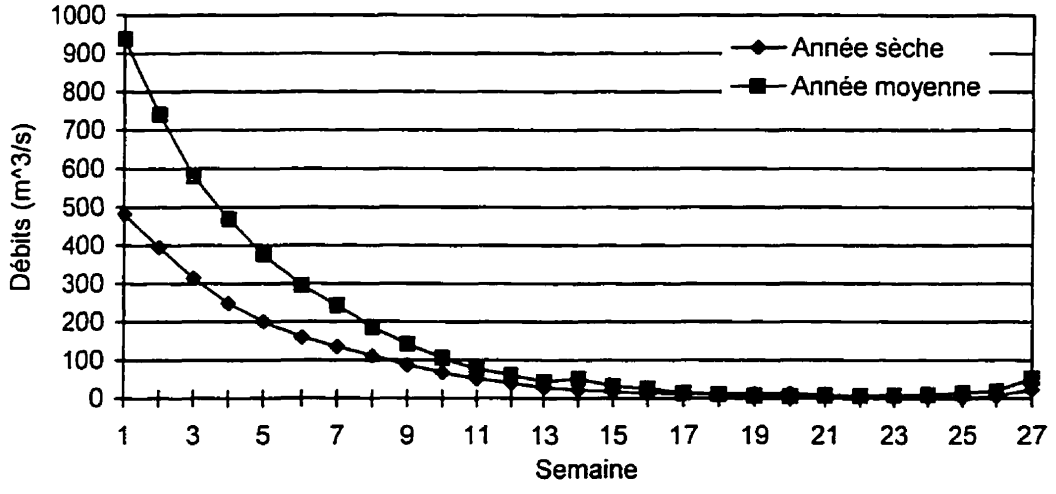



**Figure 4.1: Apports caractéristiques observés à Kandadji**

Cette figure montre que les apports naturels du fleuve Niger dans la décrue de l'hydrogramme se confondent à toutes fins pratiques en année sèche comme en année moyenne.

### 4.2.2 Les pertes par évaporation

On utilise des données d'évaporation mensuelle moyenne (MAMADOU ABDOU, 1995) pour estimer les volumes hebdomadaires d'évaporation du réservoir. Ces valeurs ont été calculées en supposant le niveau de l'eau aux cotes suivantes:

. 227 m pour la période de janvier à mars avec une surface moyenne de retenue égale à 21250 ha

. 224 m d'avril à juillet avec une surface moyenne de retenue égale à 14750 ha

### 4.2.3 La demande en énergie

On dispose d'une demande annuelle en énergie à laquelle est appliquée une modulation intermensuelle (MAMADOU ABDOU, 1995). Les demandes hebdomadaires en énergie sont calculées sous l'hypothèse d'une modulation uniforme de la demande mensuelle. La demande annuelle de 371 Gwh reflète bien la situation

des besoins des utilisateurs. Après avoir réalisé quelques simulations préliminaires, les hauteurs de chute moyenne ont été fixées à:

. 12 m de janvier à mars avec un rendement e=0.9

. 9 m d'avril à juillet avec un rendement e=0.8

La puissance installée de 75 MW est fournie par 3 turbines Kaplan de 25 MW chacune ayant un débit d'équipement de 225 $m^3/s$.

### 4.2.4 Demande de la ville de Niamey

La demande de la ville de Niamey inclut les besoins domestiques en eau et ceux des industries. Elle est relativement basse et l'habitude du milieu prouve qu'elle peut être réduite en période de pénurie. Elle est en moyenne de 1.1 $m^3/s$ (MAMADOU ABDOU, 1995).

### 4.2.5 Demande en eau d'irrigation

On suppose que le riz paddy est la seule culture pratiquée en saison sèche sur tous les périmètres. Les besoins en eau d'irrigation donnés en hauteur d'eau sont tirés des études de SOFRELEC et SATEC (1977) sur les possibilités d'irrigation à Kandadji.

### 4.2.6 Le débit réservé

Une contrainte spécifie un débit garanti de 10 $m^3/s$ à la frontière du Nigéria.

### 4.2.7 L'état du réservoir

Étant donné que même en année sèche, la pointe de l'hydrogramme du fleuve Niger à Kandadji se situe en janvier-février, on peut valablement supposer que le niveau du réservoir en début de campagne sèche avoisine la cote 228 m. L'emmagasinement cible à la fin de la saison sèche est de 520 $hm^3$, qui correspond à l'emmagasinement de la réserve morte.

### 4.2.8 Les apports des affluents intermédiaires

Les affluents intermédiaires sont des cours d'eau saisonniers qui ne coulent que durant la saison des pluies. Ils ne contribuent pas en saison sèche au débit du fleuve.

## 4.3 Étude du comportement du système sous l'influence de divers types de fonctions de pénalité sur les déficits

### 4.3.1 Établissement des coefficients de pénalité sur les déficits

Trois considérations ont guidé l'établissement des vecteurs de coefficients de pénalité sur les déficits:

(a) la stratification du déficit au niveau d'une même demande ou d'un même état cible pour distinguer la sévérité des conséquences en fonction de l'intensité du déficit;

(b) la priorisation de l'allocation entre les différentes demandes à l'intérieur d'une même période;

( c) la priorisation de l'allocation entre des demandes de même catégorie sur des périodes différentes.

On établit 3 vecteurs donnés par les tableaux 4.1, 4.2 et 4.3.

**Tableau 4.1: Vecteur C1 de coefficients de pénalité sur les déficits**

| | Arc de déficit | Semaine 1 | Semaine 2 à 6 | Semaine 7 à 10 | Semaine 11 à 13 | Semaine 14 à 18 | Semaine 19 à 27 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Réservoir | 1 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Énergie | 1 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 |
| Irrigation | 1 | 50 | 100 | 300 | 400 | 20 | 50 |
| | 2 | 1000 | 800 | 800 | 1000 | 20 | 1000 |
| | 3 | 1200 | 1000 | 1000 | 1200 | 400 | 1200 |
| Niamey | 1 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| Débit réservé | 1 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| | Dép* | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 |

**Tableau 4.2: Vecteur C2 de coefficients de pénalité sur les déficits**

| | Arc de déficit | Semaine 1 | Semaine 2 à 6 | Semaine 7 à 10 | Semaine 11 à 13 | Semaine 14 à 18 | Semaine 19 à 27 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Réservoir | 1 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Énergie | 1 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 |
| Irrigation | 1 | 50 | 100 | 300 | 400 | 20 | 50 |
| | 2 | 1000 | 800 | 800 | 1000 | 20 | 1000 |
| | 3 | 1200 | 1000 | 1000 | 1200 | 400 | 1200 |
| Niamey | 1 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| Débit réservé | 1 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| | Dép* | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 |

**Tableau 4.3: Vecteur C3 de coefficients de pénalité sur les déficits**

| | Arc de déficit | Semaine 1 | Semaine 2 à 6 | Semaine 7 à 10 | Semaine 11 à 13 | Semaine 14 à 18 | Semaine 19 à 27 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Réservoir | 1 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Énergie | 1 | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 |
| Irrigation | 1 | 50 | 100 | 300 | 400 | 20 | 50 |
| | 2 | 1000 | 800 | 800 | 1000 | 20 | 1000 |
| | 3 | 1200 | 1000 | 1000 | 1200 | 400 | 1200 |
| Niamey | 1 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| Débit réservé | 1 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| | Dép* | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 |

Note: Dép*: dépassement du débit réservé

### 4.3.2 Influence du vecteur C1

Comme le montre la figure 4.2, durant le premier quart de la période d'analyse, les prélèvements se limitent aux apports, le réservoir demeurant à sa cote maximale d'exploitation. Il y a un déversement au cours de la semaine 1. Par la suite, les prélèvements deviennent réguliers et donnent priorité à la demande en eau à l'aval.

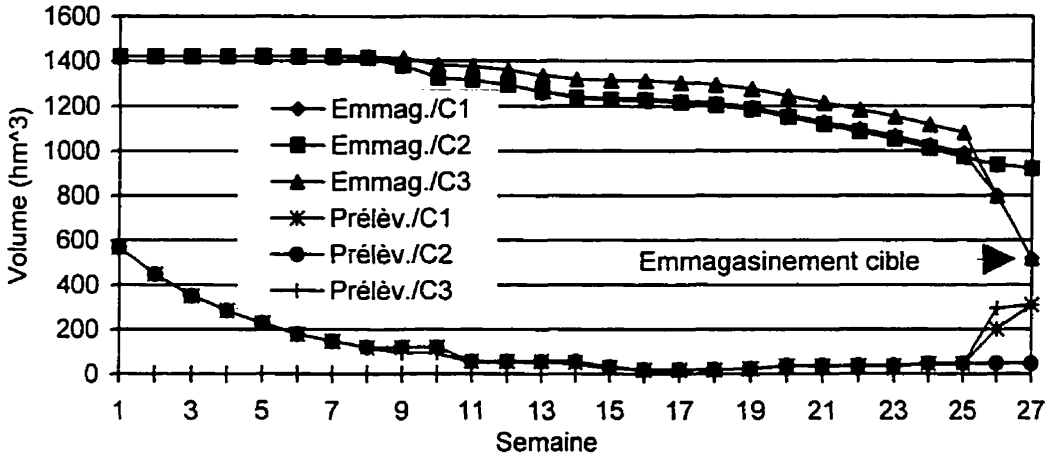



**Figure 4.2: Évolution des prélèvements et de l'emmagasinement du réservoir en année moyenne selon les vecteurs C1, C2 et C3**

En effet, durant tout l'horizon d'exploitation, la demande de la ville de Niamey, celle des périmètres B, C, D, E et le débit réservé sont satisfaits à 100%. Le débit réservé est dépassé durant les semaines 1 à 7, 26 et 27. Il faut remarquer que le dépassement du débit réservé est pénalisé pour limiter les pertes en eau au système constituées par

les eaux excédentaires envoyées au Nigéria. De ce fait, lorsqu'ils surviennent, ces dépassements sont importants pour l'exploitation car ils fournissent des informations additionnelles sur l'hydraulicité du système.

Les déficits en eau affectent la demande énergétique et celle du périmètre A.

Par rapport à la répartition des déficits sur la production d'énergie, le système a une attitude conservatrice. Se référant à la figure 4.3, durant les deux premières semaines, la demande en énergie est satisfaite à 100%. Le déficit apparaît à la semaine 3 et augmente graduellement jusqu'à la semaine 23 dans une proportion de 5 à 90% de la demande énergétique. Ensuite, il diminue progressivement de la semaine 24 à 26 pour s'annuler complètement à la dernière semaine. Ainsi le système satisfait à 100% la demande en énergie de la semaine 27. Il y a une production énergétique totale de 72300 MWh.

Quant à la demande d'irrigation du périmètre A, il y a apparition d'un déficit de l'ordre de 20% durant la première moitié de la montaison et de 38% au cours du stade de maturation.

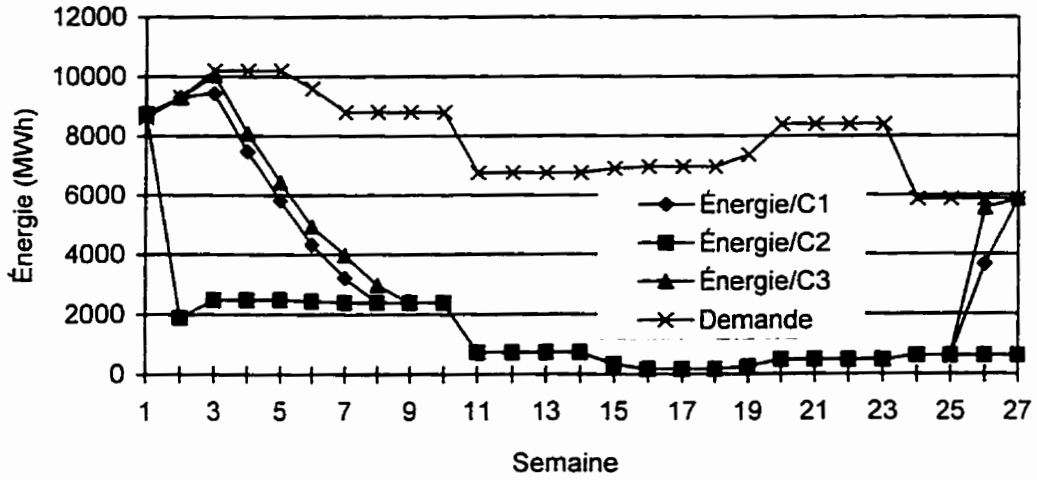



**Figure 4.3: Évolution de la production d'énergie en année moyenne selon les vecteurs C1, C2 et C3**

Par effet de Boulé, cela résulte en une perte de productivité à la récolte de l'ordre de 20%. C'est la perte relative du périmètre A par rapport à la production maximale de la surface qui y est mise en culture. Elle correspond à une perte totale de 4.9% par rapport à la production maximale de l'ensemble des surfaces mises en culture dans le système. Durant le dernier tiers de la période d'analyse, les déficits en eau d'irrigation du périmètre A varient entre 15 et 20% et affectent la mise en eau des casiers dans le cadre de la préparation de la campagne prochaine de culture.

L'emmagasinement cible est atteint en fin d'horizon.

### 4.3.3 Influence du vecteur C2

Au cours de la première moitié de la durée d'analyse, l'évolution des prélèvements globaux du réservoir est identique au cas C1 (figure 4.2). La seconde moitié de la durée d'analyse est caractérisée par une attitude conservatrice du système à l'égard de la demande aval. Le niveau du réservoir termine largement au-dessus du niveau cible. Cela résulte, par contre, en une satisfaction totale aussi bien de toutes les demandes à l'aval que de celle du périmètre A, qui n'enregistre cette fois aucun déficit. Le débit réservé n'est dépassé qu'à la semaine 1. Autrement dit, en ce qui concerne la demande énergétique, le système opère de manière à ne turbiner strictement que les volumes appelés par la demande à l'aval. De ce fait, tous les déficits sont alloués à la production d'énergie dans une proportion de 75 à 96% de la demande (figure 4.3). En effet, la pénalité sur le déficit énergétique passe de 500 à 200 et, de ce fait, avec le vecteur C2, c'est la demande aval qui gouverne la production d'énergie. L'énergie totale produite est de 38600 MWh, une réduction de 47 % comparativement à celle obtenue sous le vecteur C1.

### 4.3.4 Influence du vecteur C3

Le réservoir demeure une semaine de plus à sa cote maximale qu'il ne le fait dans le cas C1 (figure 4.2). Durant cette période, les prélèvements diminuent comparativement à C1, de manière à ce qu'à la semaine 25, le réservoir se retrouve à environ 100 $hm^3$ au-dessus du niveau obtenu avec le vecteur C1. Ce comportement rehausse la production totale d'énergie de 5700 MWh par rapport à C1 (figure 4.4). Tous les besoins en eau à l'aval sont satisfaits à 100%. Le débit réservé est dépassé durant les semaines 1 à 8, 26 et 27.

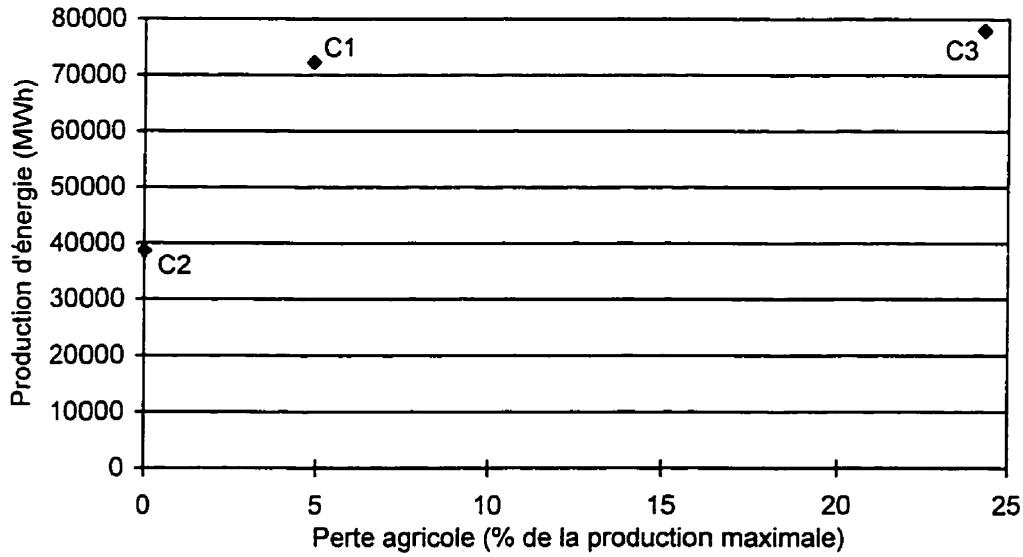



**Figure 4.4: Perte agricole versus production énergétique en année moyenne selon les vecteurs C1, C2 et C3**

Par contre, même si la production énergétique s'en trouve améliorée, il demeure encore des déficits qui sont d'ailleurs partagés avec le périmètre A. Celui-ci en est

fatalement affecté puisque les stades les plus sensibles du cycle cultural ont enregistré des déficits de l'ordre de 39 à 99%. Cela résulte en une perte totale de la récolte, ce qui correspond à une perte de 24.3% de l'ensemble des surfaces mises en culture (figure 4.4).

### 4.3.5 Conclusion

Le vecteur C1 de coefficients de pénalité induit au système une attitude "de compromis" sur la répartition des déficits entre la demande énergétique et celle d'irrigation (figure 4.4). Compte tenu de la grandeur des apports, il impose un partage des déficits entre la production d'énergie et la demande en eau du périmètre A. Sous ce vecteur, les déficits en eau apparaissent aux stades les moins sensibles du cycle cultural pour résulter en une perte de productivité minimum à la récolte (ce qui est d'ailleurs logique à cause des fonctions de pénalité utilisées). Il faut donc choisir les coefficients du vecteur de pénalité de façon à tenir compte des périodes de croissance. Quant au déficit sur la production d'énergie, il est réparti sur la durée d'analyse de manière que le système devienne résilient en supprimant totalement le déficit aux périodes finales. À ce sujet, du point de vue de la fonction économique, il n'y aurait aucune incidence si le même déficit énergétique avait lieu durant les périodes finales plutôt qu'à l'intérieur de la saison. En effet, la formulation d'OKA est également un problème de programmation linéaire; puisque la fonction de pénalité sur le déficit

énergétique est à pente unique (quelle que soit la grandeur du déficit), alors la valeur de la fonction économique ne change pas quelles que soient les périodes où le déficit est réparti, pourvu que le déficit total ne change pas. La pénalité imposée au déficit énergétique est indépendante du temps.

Le vecteur C2 induit au système une attitude "en garantie de la demande d'irrigation" et cause la satisfaction totale de la demande en eau d'irrigation (figure 4.4); il privilégie la production agricole allouant tous les déficits à la production d'énergie. Sous l'impulsion du vecteur C2, le système ne parvient pas à supprimer le déficit hydroélectrique en fin d'horizon. Il prélève légèrement plus sur les périodes devançant la dernière semaine, mais alloue ces quantités au périmètre A. Au cours de la dernière semaine, il ne produit pas plus d'énergie même si l'emmagasinement se trouve nettement au dessus du niveau cible (surplus de 401.5 $hm^3$, figure 4.2). En effet, ici on pénalise moins le déficit énergétique ($C_{ij}$=200) que le dépassement du débit réservé ($C_{ij}$=400). L'inversion de ces deux pénalités provoquerait la vidange du réservoir comme dans le cas C1, et produirait par conséquent plus d'énergie. Autrement le rehaussement de la demande d'irrigation à l'aval, constituant une contrainte, engendrerait également une plus grande production d'énergie.

À la semaine 27 se situe le début de la remontée de l'hydrogramme des apports naturels au réservoir. Lorsque l'emmagasinement final est au dessus du niveau cible, il se combine alors à des apports de plus en plus importants, ce qui se traduit par de

bonnes conditions de satisfaction des demandes futures durant le prochain horizon d'exploitation. Par contre, ceci pourrait engendrer des gaspillages d'eau en regard des disponibilités et de la demande durant la saison humide. C'est pourquoi, nous étudions au chapitre 5, l'exploitation du système pour une année complète afin de suivre l'évolution du niveau de l'eau dans le réservoir et d'évaluer si des gaspillages en eau se produisent.

Le vecteur C3 priorise la production d'énergie au détriment de l'irrigation du périmètre A. À cet égard, il donne au système une attitude "de maximisation de la production hydroélectrique" et mènerait même à l'abandon de la mise en culture du périmètre A. L'énergie totale produite est de 78000 MWh (pour le scénario d'apports moyens).

La figure 4.4 donne les niveaux de production agricole et énergétique pour toute la saison sèche en fonction des vecteurs C1, C2 et C3. La production agricole est donnée en terme de perte de productivité survenue au périmètre A en pourcentage de la productivité maximale de l'ensemble des surfaces mises en culture. On considère la production énergétique cumulée pour toute la saison. L'analyse de la figure 4.4 indique que le vecteur C1 apparaît être le meilleur compromis pour l'exploitation du système en année moyenne. En effet, par rapport au vecteur C2, le vecteur C1 cause une perte de production agricole d'environ 5%, perte suffisamment compensée par un

gain important d'énergie de l'ordre de 33700 MWh; le vecteur C3, comparé au vecteur C1, cause une perte de production agricole très importante ne permettant qu'une augmentation minime de production hydroélectrique.

## 4.4 Influence d'apports faibles sur les niveaux de production

Ce cas analyse la sensibilité des niveaux de production en année moyenne à des apports naturels faibles au réservoir. Étant donné que le comportement du système sous les différents ensembles de coefficients de pénalité est similaire au calcul en année moyenne, l'analyse des scénarios de faible hydraulicité compare les niveaux de production en année sèche et en année moyenne.

### 4.4.1 Cas sous le vecteur C1

À la figure 4.5, durant les premières semaines de la période d'analyse, le réservoir demeure à sa cote maximale d'exploitation; il arrête cependant de transiter les apports deux semaines plus tôt qu'en année moyenne. Il n'y a aucun déversement. Par la suite, le réservoir ayant amorcé sa descente, le système prélève presque les mêmes quantités (qu'en année moyenne) avec un décalage de deux semaines et ce jusqu'à la semaine 25. Le réservoir atteint plus tôt le voisinage de l'emmagasinement cible de façon que

les prélèvements, aux semaines 26 et 27, s'en trouvent comparativement à l'année moyenne très affectés. L'emmagasinement cible est atteint.

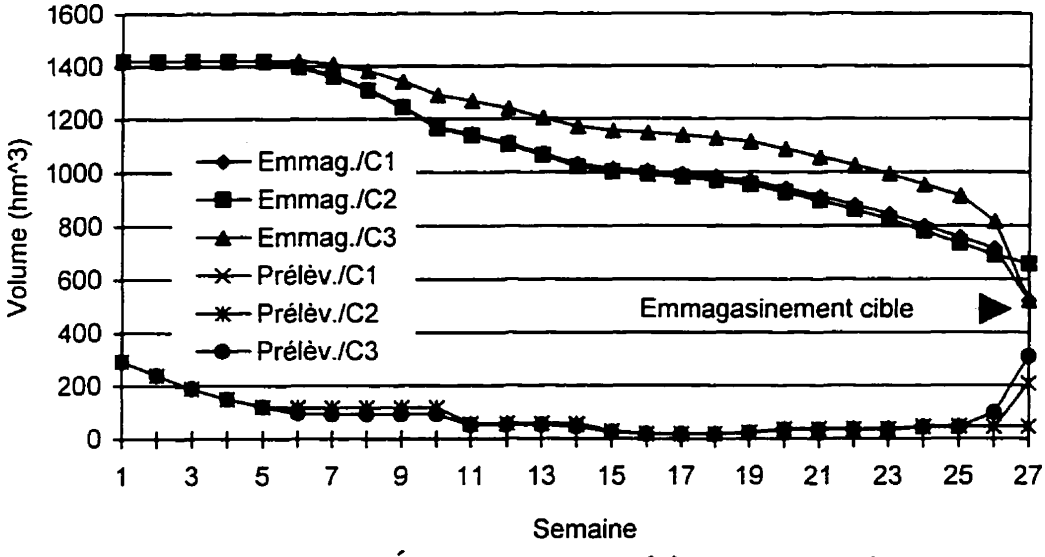



**Figure 4.5: Évolution des prélèvements et de l'emmagasinement du réservoir en année sèche selon les vecteurs C1, C2 et C3**

Ici également, durant tout l'horizon d'exploitation, la demande en eau de Niamey et celle des périmètres B, C, D, E et le débit réservé sont entièrement satisfaits. Le débit réservé n'est d'ailleurs dépassé que durant les semaines 1 à 5, et 27.

Les déficits en eau sont partagés entre la demande en énergie et le périmètre A. La baisse de niveau de production est telle qu'en aucune période, la demande énergétique n'est satisfaite à 100% (figure 4.6).

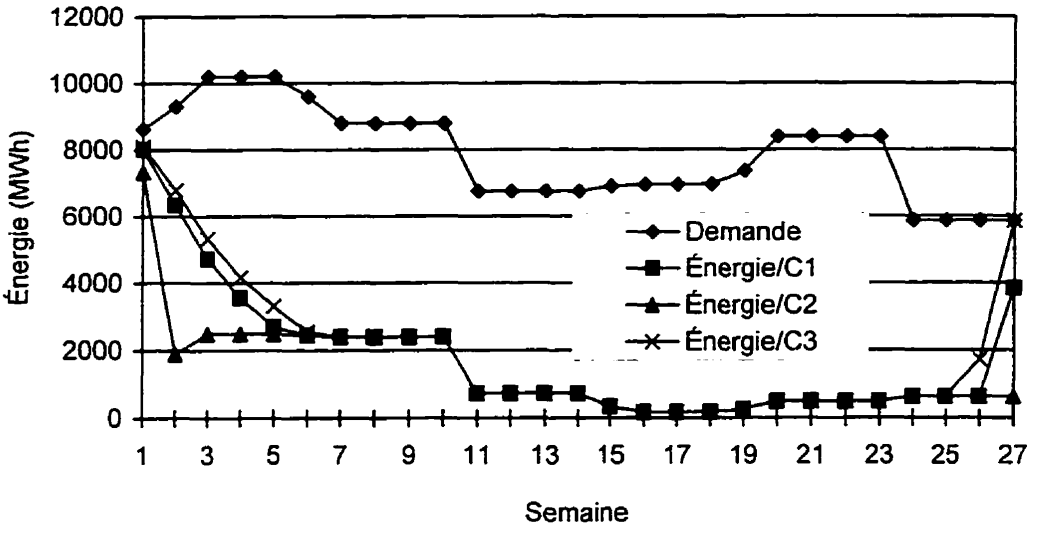



**Figure 4.6: Évolution de la production d'énergie en année sèche selon les vecteurs C1, C2 et C3**

Le système affecte un déficit énergétique de 34% à la dernière semaine, mais ne parvient pas à le supprimer complètement comme c'est le cas en année moyenne. Il y a une baisse cumulative de l'ordre de 23300 MWh par rapport à l'année moyenne.

Quant à la demande d'irrigation du périmètre A, il y a une légère augmentation de la durée du déficit (une semaine supplémentaire) au cours de la montaison. Le déficit ne change pas durant le stade de la maturation et engendre ainsi une perte de productivité de 22%, ce qui correspond à une perte de 5.3% sur l'ensemble des surfaces mises en culture (figure 4.7). Il n'y a pas de modification du déficit sur la mise en eau des casiers pour la préparation de la campagne humide de culture.

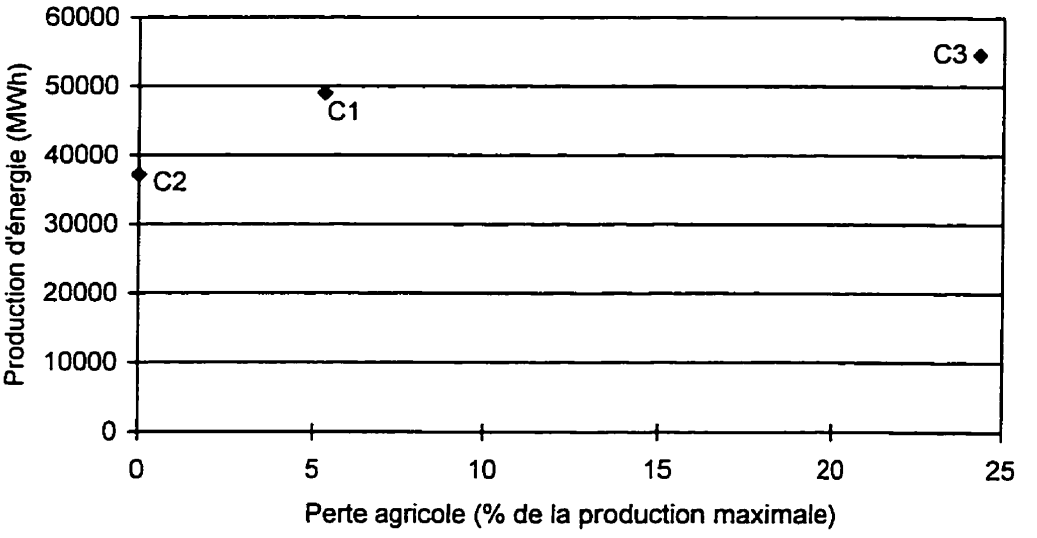



**Figure 4.7: Perte agricole versus production énergétique en année sèche selon les vecteurs C1, C2 et C3**

### 4.4.2 Cas sous le vecteur C2

Au cours de la première moitié de la période d'exploitation, les prélèvements globaux du réservoir sont identiques à ceux du cas C1 (figure 4.5). Par la suite, le système prélève les mêmes montants qu'en année moyenne. Il maintient sa tendance "en garantie de la demande d'irrigation" pour aboutir avec un emmagasinement final au-dessus de l'emmagasinement cible (surplus de 137.5 $hm^3$). Par contre, toutes les demandes à l'aval et celle du périmètre A sont satisfaites à 100%. Tous les déficits sont alloués à la demande en énergie, qui n'est jamais atteinte (figure 4.6); la production énergétique enregistre une baisse totale de 1400 MWh comparativement à l'année moyenne.

### 4.4.3 Cas sous le vecteur C3

Le réservoir amorce sa descente deux semaines plus tôt qu'en année moyenne. Par la suite, le système prélève les mêmes volumes qu'en année moyenne jusqu'à la semaine 25. Comparativement à l'année moyenne, il y a une baisse de production d'énergie de 23300 MWh répartis sur les semaines 1 à 8, et 26. Il n'y a pas de déficit d'énergie à la dernière semaine (figure 4.6). Par contre, les déficits en eau sont fatals au périmètre A qui perd toute la récolte.

Les demandes en eau des périmètres B, C, D, E, de la ville de Niamey et le débit réservé sont atteints à 100% et le débit réservé n'est dépassé que durant les semaines 1 à 6, 26 et 27. L'emmagasinement cible est atteint.

### 4.4.4 Conclusion

La réaction du système sous les vecteurs C1, C2 et C3 n'est pas modifiée par rapport à l'année moyenne. Il y a modification des niveaux de production du système. Sous les vecteurs C1 et C2, la baisse de production s'est manifestée par une apparition prématurée et une augmentation de la durée du déficit sur la demande du périmètre A.

Sur la production hydroélectrique, la baisse a lieu aux semaines 1 à 7, 26 et 27. Elle varie entre 9 et 54% de la production d'énergie en année moyenne.

Avec le vecteur C3, la baisse des niveaux de production porte uniquement sur la production d'énergie (la récolte au périmètre A étant perdue autant en année moyenne qu'en année sèche).

En conclusion, comme le montre la figure 4.7, même en année sèche le vecteur C1 semble représenter le meilleur compromis pour la répartition des déficits entre la production d'énergie et la demande en eau d'irrigation.

## 4.5 Étude des compromis entre la garantie du débit réservé et les autres objectifs du système

Cette analyse détermine l'influence du rehaussement du débit réservé sur la satisfaction des autres demandes dans le système. À cette fin, deux scénarios sont étudiés:

- le scénario QR30 dans lequel le débit réservé passe de 10 $m^3/s$ à 30 $m^3/s$;
- le scénario QR60 dans lequel le débit réservé passe de 10 $m^3/s$ à 60 $m^3/s$ .

Le système est exploité sous le vecteur C1.

### 4.5.1 Conditions d'apports moyens

En terme de niveaux de production, la production agricole n'est pas affectée; elle reste la même qu'en QR10 (figure 4.8). La seule incidence remarquable se trouve sur la répartition de la production énergétique. En effet, dans le scénario QR30, le niveau du réservoir descend légèrement plus rapidement que dans le QR10 (figure 4.9).

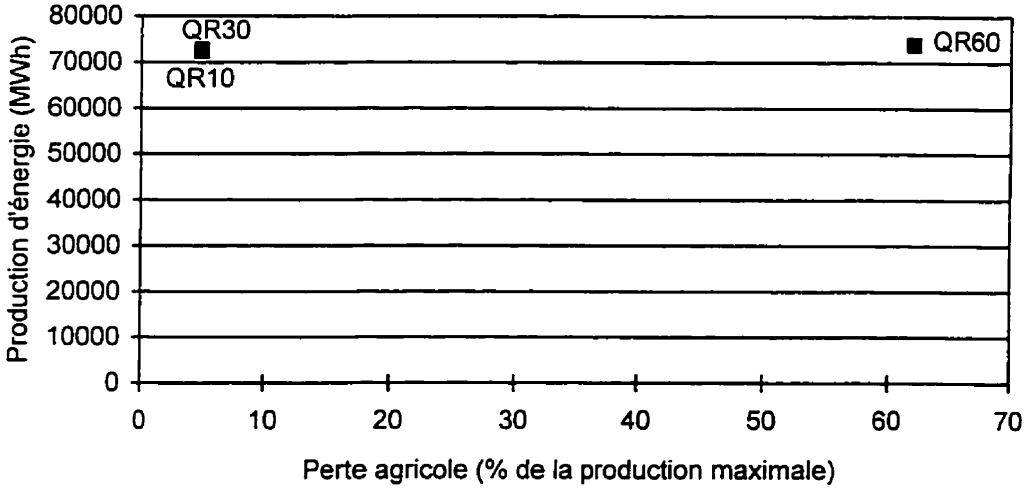



**Figure 4.8: Perte agricole versus production énergétique en année moyenne selon le débit réservé**

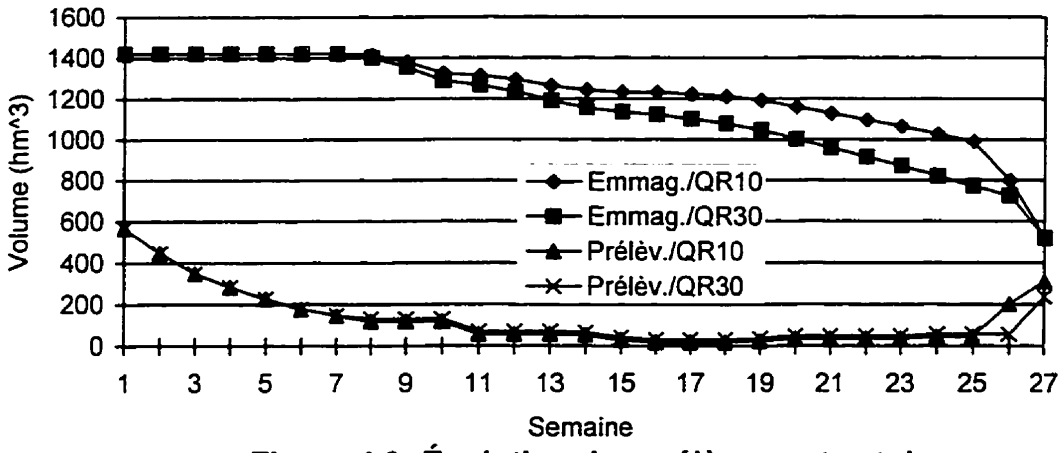



**Figure 4.9: Évolution des prélèvements et de l'emmagasinement en année moyenne dans QR10 et QR30**

Ainsi que le montre la figure 4.10, l'énergie hebdomadaire produite durant les semaines à l'intérieur de la saison, augmente légèrement. Par contre, la descente relativement plus rapide du réservoir fait que la production d'énergie, sur les deux dernières périodes, enregistre un déficit relativement plus important. La production totale d'énergie est sensiblement plus élevée avec 400 MWh additionnels. De ce fait, l'imposition du débit réservé de 30 $m^3/s$ induit une production énergétique de base, supérieure au cas QR10, résultant ainsi en une production cumulative globale légèrement plus importante.

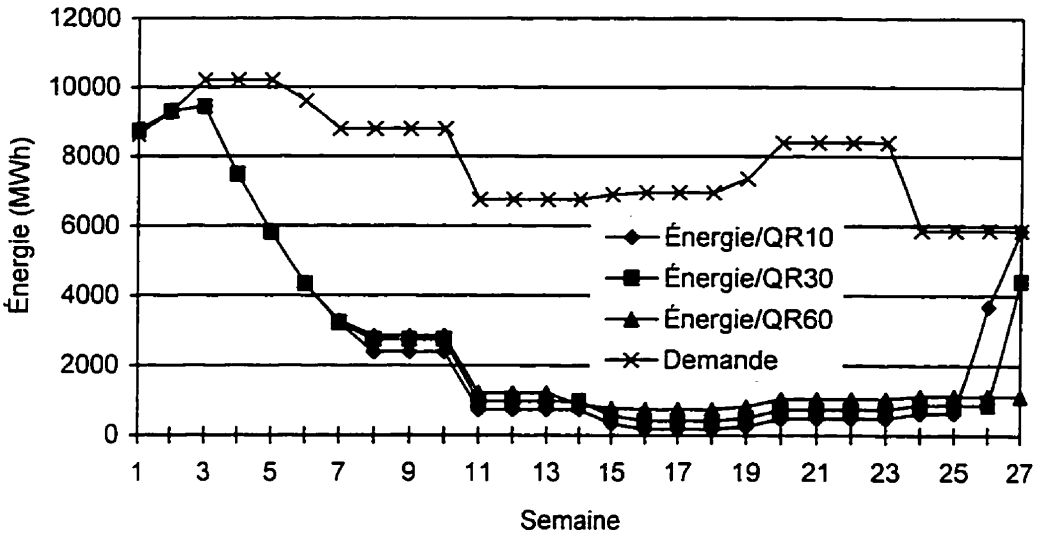



**Figure 4.10: Évolution de la production d'énergie en année moyenne selon le débit réservé**

La garantie d'un débit réservé de 60 $m^3/s$ en année moyenne s'accompagne d'une perte de productivité agricole totale d'environ 62% (tableau 4.4). Cette fois, tous les périmètres irrigués enregistrent une perte à la récolte. Ce débit réservé engendre également à la ville de Niamey, un déficit hebdomadaire en eau de l'ordre de 9% durant les semaines 8 à 27 (figure 4.11).

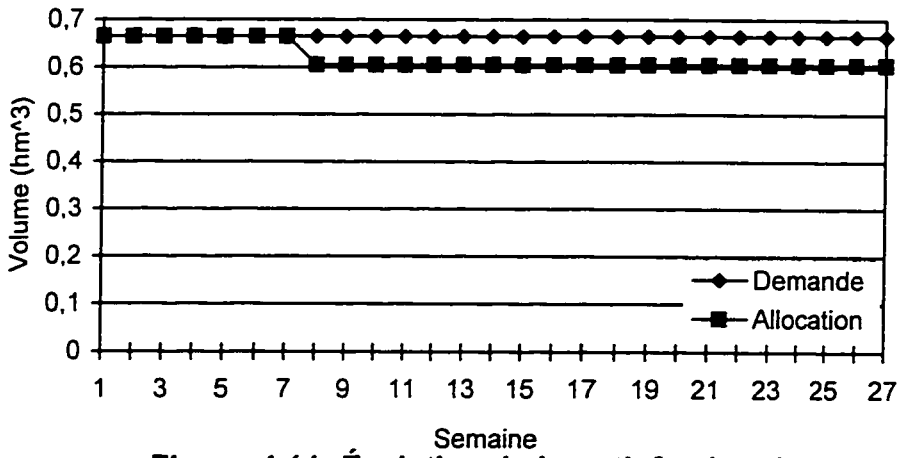



**Figure 4.11: Évolution de la satisfaction de la demande en eau de Niamey en année moyenne sous QR60**

La perte agricole importante n'entraîne pas cependant un gain marginal considérable en énergie: QR60 ne produit que 1600 MWh supplémentaires en année moyenne comparativement à QR10 (figure 4.8), même si la production hebdomadaire s'en retrouve légèrement améliorée (figure 4.10)

**Tableau 4.4: Perte de productivité agricole avec QR60 en année moyenne**

| Périmètre | A | B | C | D | E | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Surfaces(ha) | 34000 | 21295 | 29285 | 9000 | 46430 | Σ=140010 |
| Perte relative | 0.70 | 0.64 | 0.63 | 0.62 | 0.55 | |
| Perte totale | 0.17 | 0.10 | 0.13 | 0.04 | 0.18 | Σ=0.62 |

### 4.5.2 Conditions d'apports faibles

Comme le montre le tableau 4.5, en année sèche, imposer le débit réservé à 30 $m^3/s$ engendre une perte agricole totale de l'ordre de 27%, tous les périmètres étant affectés. La ville de Niamey n'enregistre aucun déficit, tandis que la production énergétique remonte légèrement (figure 4.12) avec un surplus total de 1300 MWh comparativement à QR10 en année sèche (figure 4.13).

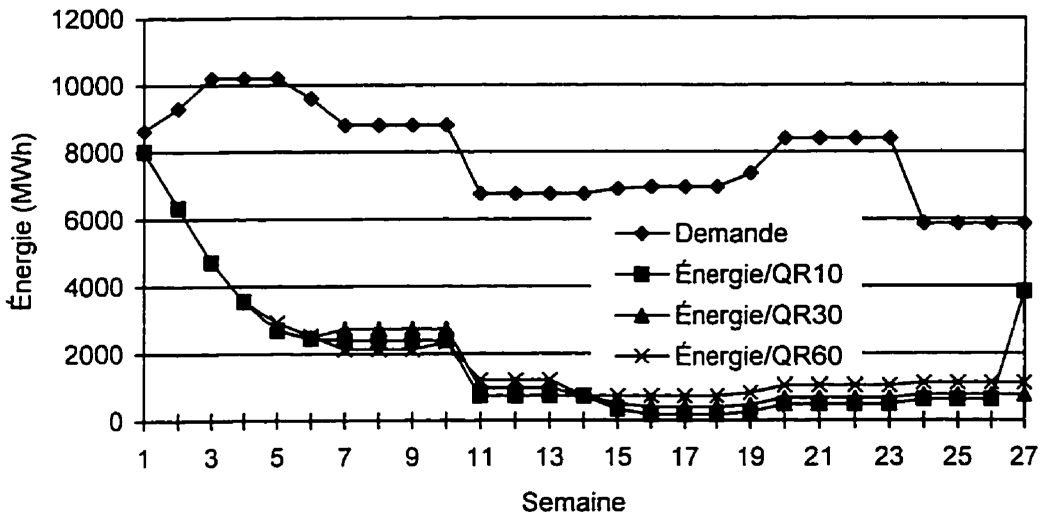



**Figure 4.12: Évolution de la production d'énergie en année sèche selon le débit réservé sous le vecteur C1**

**Tableau 4.5: Perte de productivité agricole avec QR30 en année sèche**

| Périmètre | A | B | C | D | E | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Surfaces(ha) | 34000 | 21295 | 29285 | 9000 | 46430 | Σ=140010 |
| Perte relative | 0.69 | 0.14 | 0.15 | 0.10 | 0.13 | |
| Perte totale | 0.17 | 0.02 | 0.03 | 0.01 | 0.04 | Σ=0.27 |

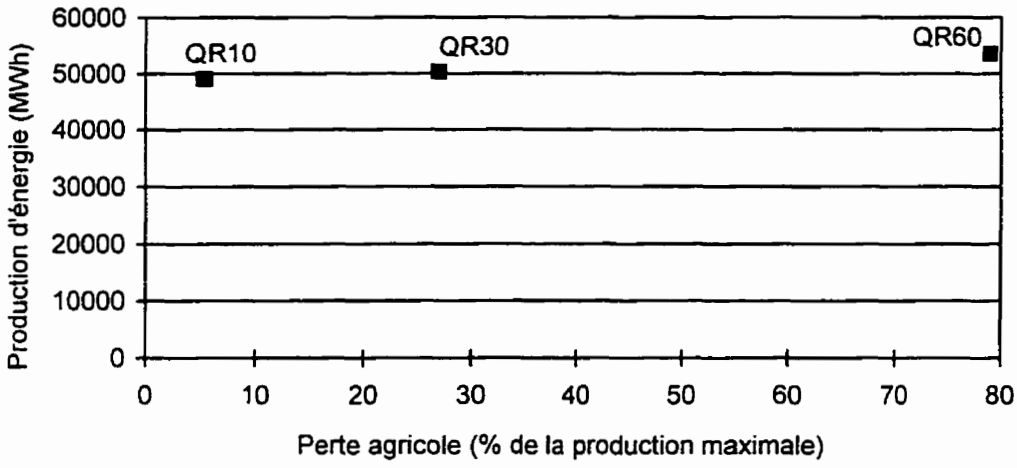



**Figure 4.13: Perte agricole versus production énergétique en année sèche selon le débit réservé**

Lorsqu'on impose le débit réservé de 60 $m^3/s$ en année sèche, les périmètres irrigués sont fatalement touchés dans une proportion de 71 à 100% de leur productivité optimale. La perte totale résultante est de l'ordre de 79% de la productivité maximale (tableau 4.6). Comme le présente la figure 4.14, la ville de Niamey enregistre aussi un déficit hebdomadaire de 9% durant les semaines 5 à 27. Sur toute la seconde moitié de la durée d'analyse, le fonctionnement en base de la centrale gouverné par QR60, relève sensiblement la production énergétique (figure 4.12); le gain marginal total en énergie est de 4500 MWh.

**Tableau 4.6: Perte de productivité agricole avec QR60 en année sèche**

| Périmètre | A | B | C | D | E | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Surfaces(ha) | 34000 | 21295 | 29285 | 9000 | 46430 | Σ=140010 |
| Perte relative | 1.00 | 0.80 | 0.71 | 0.73 | 0.71 | |
| Perte totale | 0.24 | 0.12 | 0.15 | 0.05 | 0.23 | Σ=0.79 |

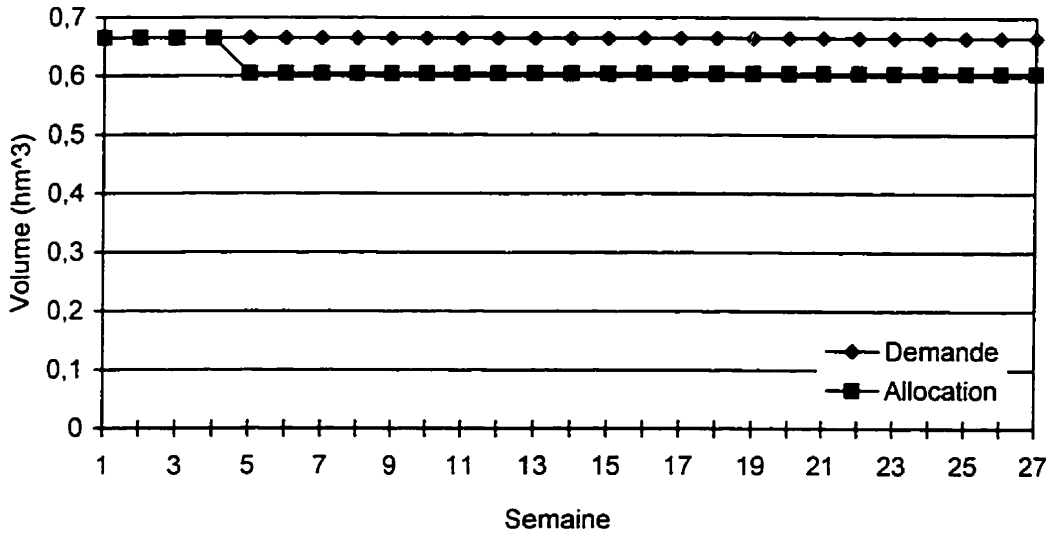



**Figure 4.14: Évolution de la satisfaction de la demande en eau de Niamey en année sèche sous QR60**

### 4.5.3 Conclusion

En année moyenne, il pourrait être avantageux que le débit réservé soit de 30 $m^3/s$: la production agricole n'est comparativement pas affectée; on produit plus d'énergie par semaine et d'énergie totale dans la saison avec évidemment une meilleure satisfaction pour le Nigéria. Par contre, en année sèche, la décision de garantir QR30

s'accompagnerait d'un gain marginal d'énergie de 1300 MWh soit 0.6% de la demande de saison sèche, et d'une perte marginale de productivité agricole de l'ordre de 21.7%.

La garantie d'un débit réservé de 60 $m^3/s$ serait difficilement envisageable même en année moyenne. Elle entraînerait, en effet, l'abandon de la mise en culture de plus de la moitié des surfaces exploitables durant la saison sèche.

## 4.6 Étude de l'influence d'une réduction de l'emmagasinement initial

Le scénario de base prévoit un réservoir plein au début de la campagne de culture en saison sèche. Cette hypothèse est basée sur le fait que le pic de l'hydrogramme des apports naturels à Kandadji se situe au voisinage de fin janvier-début février. Cependant, un décalage de ce pic vers fin décembre-début janvier (comme c'est le cas à certaines années) pourrait résulter en une réduction de l'emmagasinement du réservoir au début de la campagne de culture. Ce cas analyse les conséquences sur les niveaux de production, suite à une diminution effective de l'emmagasinement initial du réservoir. L'exploitation du système est étudiée sous le vecteur C1. Les résultats obtenus sont résumés ci-dessous.

En année moyenne, cette diminution de l'emmagasinement initial du réservoir n'a aucune incidence réelle sur les niveaux de production du système. Seul le prélèvement à la semaine 1 diminue et n'affecte que les quantités déversées.

En année sèche, la diminution du prélèvement à la semaine 1, provoque une baisse de 6500 MWh de production d'énergie uniquement durant cette semaine (tableau 4.7). Durant la semaine suivante, le réservoir aura vite retrouvé la cote maximale d'exploitation. Les autres productions du système demeurent inchangées.

En conclusion, les apports en eau, en début de la campagne sèche de culture, sont relativement abondants même en année sèche, de telle sorte qu'une diminution de l'ordre de 220 $hm^3$ sur l'emmagasinement initial n'a qu'une influence mineure sur la production du système.

**Tableau 4.7: Influence de la diminution de l'emmagasinement initial sur les niveaux de production: seule la semaine 1 est affectée**

| | Emmagasinement initial ($hm^3$) | Prélèvement ($hm^3$) | Énergie (MWh) |
|---|---|---|---|
| **Année moyenne** | $S_0$=1420 | 567.5 | idem |
| | $S_0$=1200 | 347.5 | idem |
| **Année sèche** | $S_0$=1420 | 292 | 8020 |
| | $S_0$=1200 | 72 | 1550 |

## 4.7 Influence du retrait de la contrainte sur l'emmagasinement cible

Ce cas d'étude basé sur les apports moyens cherche à déterminer le comportement du système lorsqu'il n'y a pas de niveau cible fixé sur l'emmagasinement final par une politique d'exploitation à moyen terme.

### 4.7.1 Cas sous le vecteur C1

Il y a modification de l'état du système durant les trois dernières semaines. Les prélèvements sont plus importants aux semaines 25 et 26: cela a eu pour effet de plonger le niveau du réservoir en-dessous de ce qui aurait été l'emmagasinement cible (figure 4.15). Ainsi, l'emmagasinement final enregistre un déficit de 280.5 $hm^3$. La production d'énergie aux semaines 25 et 26 est beaucoup plus importante (figure 4.16); par contre elle est nulle (0 MWh) à la semaine 27.

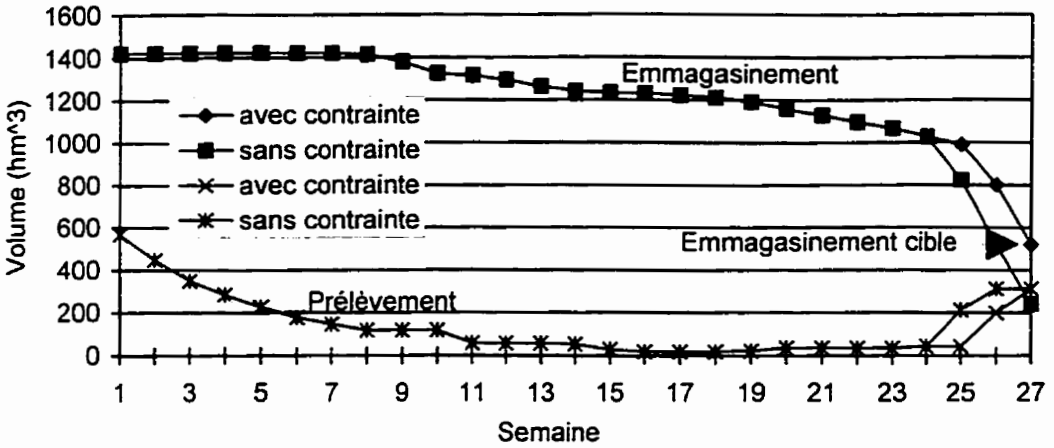



**Figure 4.15: Évolution des prélèvements et de l'emmagasinement avec et sans contrainte sur l'emmagasinement cible sous le vecteur C1**

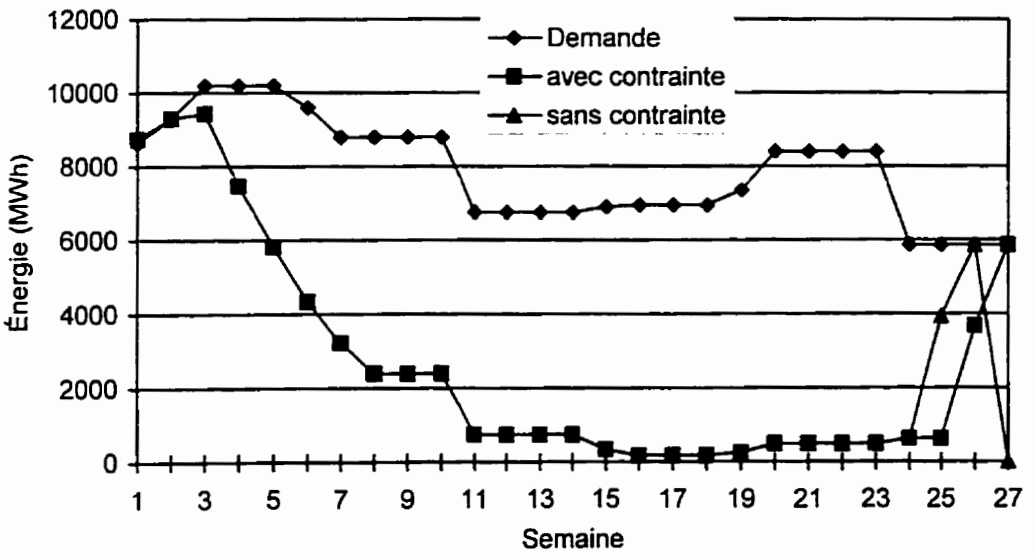



**Figure 4.16: Évolution de la production d'énergie avec et sans contrainte sur l'emmagasinement cible sous le vecteur C1**

### 4.7.2 Cas sous le vecteur C2

Ici, la suppression de la contrainte sur l'emmagasinement cible n'a aucune influence sur les résultats du modèle. Ceci est cohérent avec les résultats de la section 4.3.3. En effet, le vecteur C2 priorise moins la production d'énergie comparativement à la production agricole. Il engendre des déficits importants à la production d'énergie et entraîne le réservoir à conserver plus d'eau si bien que la contrainte d'emmagasinement cible est non limitative (les résultats de la section 4.3.3 montrent que l'emmagasinement termine au dessus de l'emmagasinement cible) en raison de l'influence des coefficients du vecteur C2.

### 4.7.3 Cas sous le vecteur C3

Les prélèvements sont comparativement plus élevés aux semaines 24, 25 et 26; ceci provoque une vidange totale du réservoir à la fin de la semaine 27 (figure 4.17). La production d'énergie, bien que plus importante aux périodes 24 et 25, enregistre un gros déficit à la semaine 26 et est nulle (0 MWh) à la semaine 27 (figure 4.18). En effet, à la semaine 27, le prélèvement effectué losrque le niveau du réservoir est en-dessous de la cote minimale d'exploitation ne produit pas d'énergie.

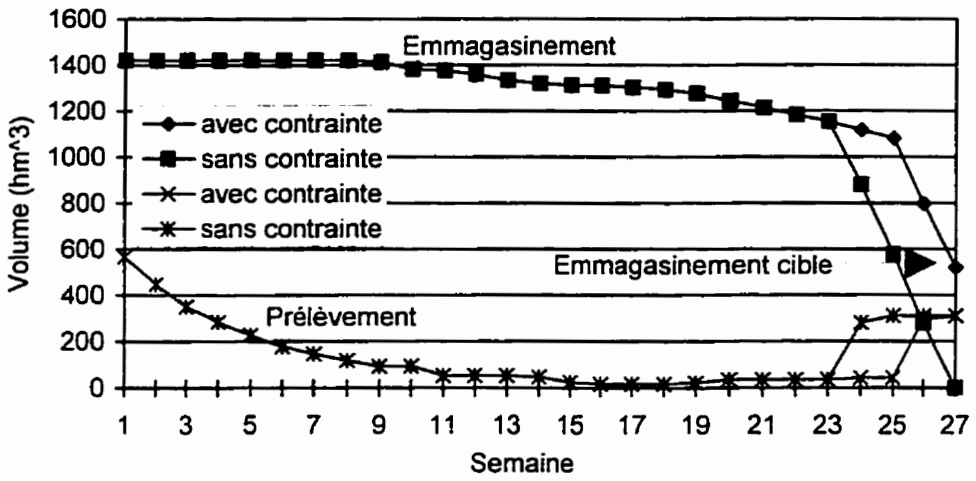



**Figure 4.17: Évolution des prélèvements et de l'emmagasinement avec et sans contrainte sur l'emmagasinement cible sous le vecteur C3**

### 4.7.4 Conclusion

L'absence de contrainte d'emmagasinement cible entraîne le système à vouloir supprimer plus tôt le déficit énergétique des périodes finales: ceci a pour effet de provoquer la vidange du réservoir sous les vecteurs C1 et C3. Ce comportement fait ressortir la limite du modèle: lorsque la pénalité imposée au déficit énergétique est relativement forte, le système a tendance à prélever les quantités turbinables correspondant à la demande énergétique pour supprimer le déficit; par contre, le modèle ne distingue pas les quantités qui ne produiraient pas d'énergie parce qu'elles seraient prélevées sous la cote minimale d'exploitation du réservoir. Cette tendance se confirme d'autant plus que sous le vecteur C2 ( dont la pénalité sur le déficit

énergétique est minimale), la suppression de la contrainte sur l'emmagasinement cible n'a aucune influence sur le comportement du système.

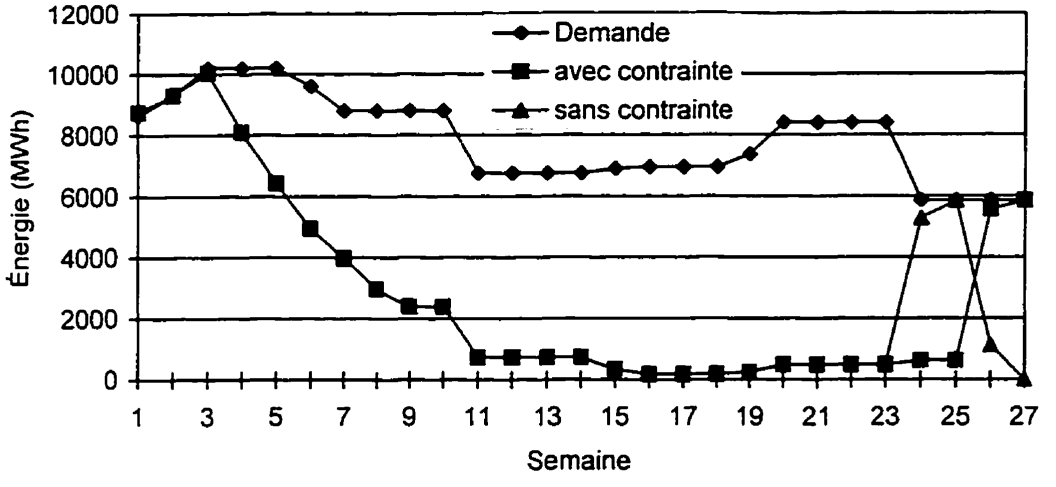



**Figure 4.18: Évolution de la production d'énergie avec et sans contrainte sur l'emmagasinement cible sous le vecteur C3**

## 4.8 Conclusion

Le système hydrique de Kandadji exhibe les caractéristiques de comportement suivantes:

1) la réserve active est petite en regard des apports annuels;

2) les demandes en eau des périmètres B à E et de Niamey ne sont pas conflictuelles avec la production d'énergie hydroélectrique;

3) seul le périmètre A est en conflit avec la production d'énergie hydroélectrique puisque les eaux dérivées à l'irrigation ne sont pas turbinées;

4) le débit réservé à la frontière du Nigéria est conflictuel avec la ville de Niamey et l'irrigation. Le débit de 30 $m^3/s$ semble être la limite maximale garantissable en saison sèche avec un abandon éventuel du quart des surfaces exploitables en année sèche.

Les plus faibles apports naturels en année sèche sont comparables aux plus faibles apports en année moyenne. Ceci est une caractéristique des systèmes hydriques sahéliens. Des systèmes de production électrique autre qu'hydroélectrique sont nécessaires dans de telles conditions.

Le choix des coefficients de pénalité a une influence déterminante dans l'établissement de la politique de prélèvements hebdomadaires et dans la priorisation des allocations d'eau entre les utilisateurs.

Les études effectuées se rapportent à l'exploitation du système en saison sèche, période durant laquelle la pénurie est fréquente. Pour confirmer ou mieux appréhender le comportement du système, il est nécessaire de situer l'exploitation en saison sèche dans une perspective de continuité du cycle de l'exploitation annuelle, incluant celle durant la saison humide. L'exploitation annuelle du système est simulée sur plusieurs

années d'apports observés sous le vecteur C1. Elle déterminera les niveaux de production du système et fait l'objet du chapitre suivant.

# CHAPITRE V: EXPLOITATION D'UN SYSTÈME HYDRIQUE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE

L'outil de calcul, décrit au chapitre 3 et utilisé au chapitre 4 pour réaliser quelques études sur l'exploitation du système de Kandadji, sert dans ce chapitre pour simuler les productions annuelles en avenir connu et documenter l'évolution du système. Les productions annuelles simulées apportent un éclairage sur le niveau de développement à proposer pour chaque composante de ce système et aident à cerner le niveau de développement durable.

## 5.1 Données d'entrée aux simulations annuelles

Les apports journaliers observés au site du barrage sont agrégés en valeurs hebdomadaires, le pas de temps des simulations étant la semaine. Il est supposé que les affluents du fleuve ne contribuent pas à son débit; en période sèche, c'est effectivement le cas et en période humide, leur contribution totale demeure inférieure à 3% du module annuel du fleuve à Niamey. Le tableau 5.1 présente pour chaque année d'observation, le module annuel ($m^3/s$), statistique utilisée pour qualifier l'année de forte, moyenne ou faible hydraulicité.

**Tableau 5.1: Module annuel et indice d'hydraulicité du fleuve Niger à Kandadji**

| Année | Module annuel ($m^3/s$) | Indice d'hydraulicité |
|---|---|---|
| 1 | 708.3 | forte |
| 2 | 860.3 | forte |
| 3 | 710.1 | forte |
| 4 | 708.2 | forte |
| 5 | 654.9 | moyenne |
| 6 | 507.2 | faible |
| 7 | 572.1 | faible |
| 8 | 497.3 | faible |
| 9 | 475.8 | faible |
| 10 | 612.3 | moyenne |
| 11 | 506.8 | faible |
| 12 | 511.6 | faible |
| 13 | 576.9 | faible |
| 14 | 779.3 | forte |

Le modèle réseau de l'exploitation (scénario de base présenté en 4.1) est étendu pour couvrir une durée de 52 semaines. Le vecteur C1 est aussi étendu à l'horizon annuel par l'ajout de coefficients de pénalité (tableau 5.2) pour les périodes charnières de mise en pépinière et de récolte; la valeur de ces coefficients est choisie de manière à respecter les priorisations de satisfaction des demandes recherchées par ce scénario.

Aucun emmagasinement cible n'est imposé que ce soit à la fin des périodes sèche ou humide, afin de voir si cette liberté additionnelle est acceptable ou non.

Le débit réservé à la frontière est de 10 $m^3/s$. Les hauteurs de chute moyenne retenues pour la production hydroélectrique sont présentées au tableau 5.3.

**Tableau 5.2: Vecteur C1 étendu à l'année**

| | Emmagasinement du réservoir | Énergie | Irrigation | | | Niamey | Débit réservé | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Semaine | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 | dép* |
| 1 à 3 | 100 | 500 | 100 | 800 | 1000 | 300 | 1000 | 400 |
| 4 à 7 | 100 | 500 | 300 | 800 | 1000 | 300 | 1000 | 400 |
| 8 à 10 | 100 | 500 | 400 | 1000 | 1200 | 300 | 1000 | 400 |
| 11 à 15 | 100 | 500 | 20 | 100 | 600 | 300 | 1000 | 400 |
| 16 à 19 | 100 | 500 | 20 | 20 | 400 | 300 | 1000 | 400 |
| 20 à 23 | 100 | 500 | 50 | 750 | 950 | 300 | 1000 | 400 |
| 24 | 100 | 500 | 50 | 1000 | 1200 | 300 | 1000 | 400 |
| 25 à 29 | 100 | 500 | 100 | 800 | 1000 | 300 | 1000 | 400 |
| 30 à 33 | 100 | 500 | 300 | 800 | 1000 | 300 | 1000 | 400 |
| 34 à 36 | 100 | 500 | 400 | 1000 | 1200 | 300 | 1000 | 400 |
| 37 à 41 | 100 | 500 | 20 | 100 | 600 | 300 | 1000 | 400 |
| 42 à 45 | 100 | 500 | 20 | 20 | 400 | 300 | 1000 | 400 |
| 46 à 49 | 100 | 500 | 50 | 750 | 950 | 300 | 1000 | 400 |
| 50 | 100 | 500 | 50 | 1000 | 1200 | 300 | 1000 | 400 |
| 51 et 52 | 100 | 500 | 100 | 800 | 1000 | 300 | 1000 | 400 |

Note: dép*: arc de dépassement du débit réservé

Elles sont fixées après avoir simulé et vérifié l'évolution approximative du niveau du réservoir. L'erreur induite sur la production énergétique est négligeable en raison de la faible amplitude de variation de la chute nette d'une semaine à l'autre. En effet, le marnage du réservoir est restreint à l'échelle des périodes considérées.

**Tableau 5.3: Hauteur de chute moyenne pour l'hydroélectricité**

| Période | Hauteur de chute moyenne (m) |
|---|---|
| janvier-mars | 12 |
| avril-juillet | 9 |
| août-septembre | 9 |
| octobre-décembre | 12 |

## 5.2 Exemple de résultats

Les figures 5.1 et 5.2, et les tableaux 5.4 et 5.5 présentent en exemple les résultats calculés par le modèle KANDOKA pour une année (ici année 8).

L'analyse de la figure 5.1 montre que l'emmagasinement final vérifie l'hypothèse d'un réservoir plein en début de saison sèche de l'année suivante (année 9). Le niveau du réservoir diminue progressivement avec une pente douce durant les semaines 8 à 19, plus prononcée durant les semaines 20 à 29, et avec une pente forte aux semaines 30 à 34. Cette pente forte débouche sur la vidange du réservoir jusqu'à la cote minimale d'exploitation (qui n'est d'ailleurs pas violée), et engendre une production d'énergie approchant la demande à la semaine 30 et la satisfaisant entièrement aux semaines 31 à 34 (figure 5.2). Cette vidange du réservoir intervient dans la période de remontée de l'hydrogramme, les apports devenant de plus en plus importants. Ainsi que le montre la figure 5.1, aux semaines 35 à 39, le réservoir remonte brutalement à la cote maximale d'exploitation dans un intervalle de 5 semaines.

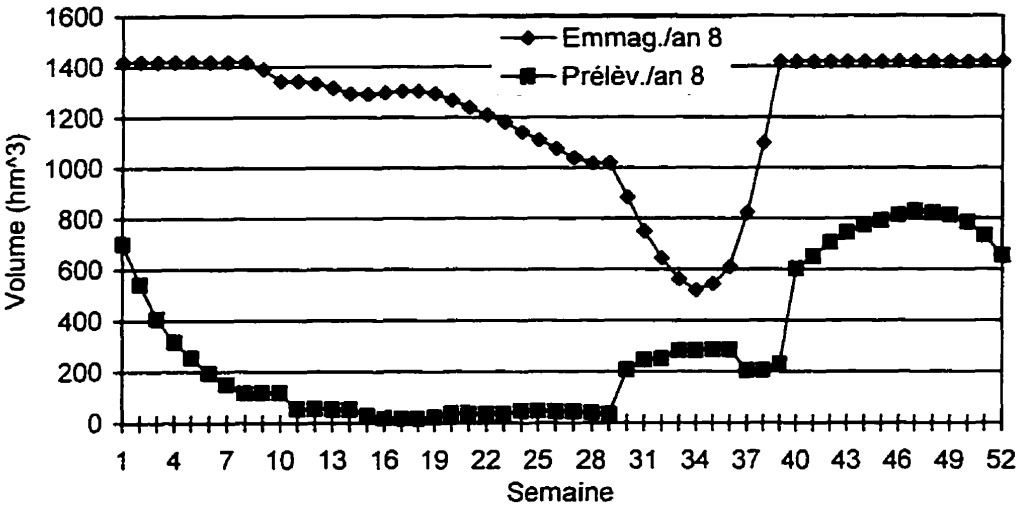



**Figure 5.1: Évolution des prélèvements et de l'emmagasinement à l'année 8**

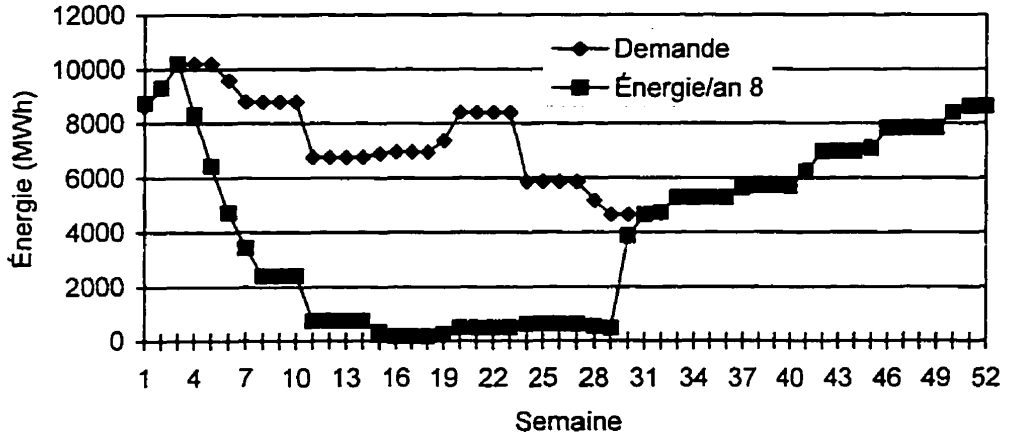



**Figure 5.2: Évolution de la production d'énergie à l'année 8**

Comme le montre la figure 5.2, la courbe de la production d'énergie a une allure similaire à celle des apports naturels au réservoir (figure 3.2). Les apports étant très faibles en saison sèche, induisent des déficits considérables à la production d'énergie. De même, les apports naturels devenant importants en saison humide (semaines 28 à 52), engendrent une satisfaction totale de la demande en énergie aux semaines 31 à 52. La production d'énergie à l'année 8 est de 67 GWh en saison sèche, soit 31.5% de la demande et de 149 GWh en saison humide, soit 94% de la demande saisonnière.

Les tableaux 5.4 et 5.5 présentent respectivement la production agricole en saison sèche et en saison humide.

**Tableau 5.4: Production agricole en saison sèche à l'année 8**

| Périmètre | A | B | C | D | E | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Surfaces (ha) | 34000 | 21295 | 29285 | 9000 | 46430 | $\Sigma$=140010 |
| Perte relative | 0.12 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Perte totale | 2.9 | 0 | 0 | 0 | 0 | $\Sigma$=2.9 |
| Production agricole totale du système | | | | | | $\Sigma$=97.1 |

**Tableau 5.5: Production agricole en saison humide à l'année 8**

| Périmètre | A | B | C | D | E | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Surfaces (ha) | 34000 | 21295 | 29285 | 9000 | 46430 | $\Sigma$=140010 |
| Perte relative | 0.12 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Perte totale | 2.9 | 0 | 0 | 0 | 0 | $\Sigma$=2.9 |
| Production agricole totale du système | | | | | | $\Sigma$=97.1 |

Les déficits en eau ont lieu au périmètre A aussi bien en saison sèche qu'en saison humide. En saison sèche, les déficits apparaissent au stade de formation des graines et de la maturation sur une durée de cinq semaines. Ils engendrent une baisse de productivité de 12%, soit 2.9% par rapport à l'ensemble des superficies mises en culture. En saison humide, les déficits ont lieu au cours de la première moitié de la montaison et infligent une baisse de productivité de 12% au périmètre A. En effet, pour la campagne de culture de saison humide, les trois premières semaines de la montaison correspondent à la fin de la saison sèche (semaines 25 à 27) et le début de l'année hydrologique. La campagne de saison humide ne débute pas à l'intérieur de la saison humide où les apports au réservoir sont relativement importants. C'est pourquoi, elle souffre aussi des déficits sur la première partie de la montaison.

Les autres demandes du système, Niamey et le débit réservé, sont satisfaits autant en saison sèche qu'en saison humide.

## 5.3 Synthèse des résultats simulés pour les 14 années d'observation des apports naturels

Les résultats de chaque simulation sont agrégés pour obtenir les productions par saison et par année. Les sections suivantes présentent ces résultats agrégés pour chaque

production, documentent les niveaux atteints à la fin de l'année hydrologique et élaborent sur les niveaux de développement durable.

### 5.3.1 Satisfaction de la demande énergétique

La figure 5.3 présente l'évolution de la production totale annuelle d'énergie. Cette production ne dépasse pas 72% de la demande annuelle de 371 GWh qui n'est jamais atteinte même en année forte.

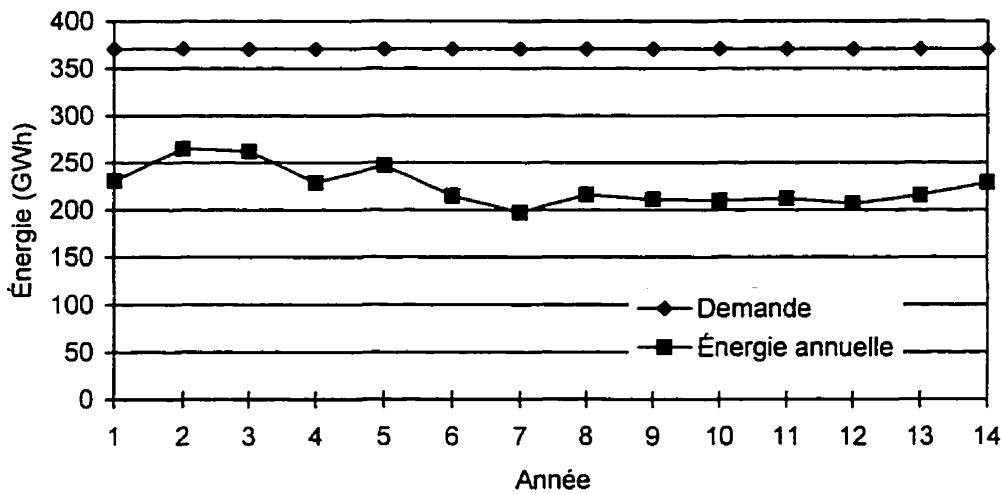



**Figure 5.3: Évolution de la production annuelle d'énergie**

L'analyse de la répartition de l'énergie produite dans l'année, montre que même en période de sécheresse (année 7 et 8), la demande de 159 GWh en saison humide est toujours satisfaite à plus de 94% (figure 5.4) et que c'est en saison sèche que les

déficits de production sont élevés.

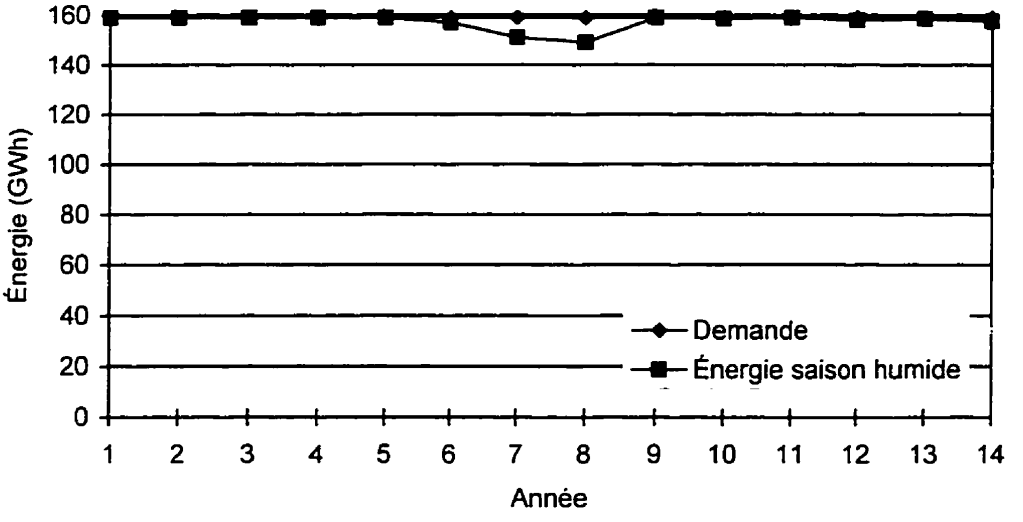



**Figure 5.4: Évolution de la production d'énergie en saison humide**

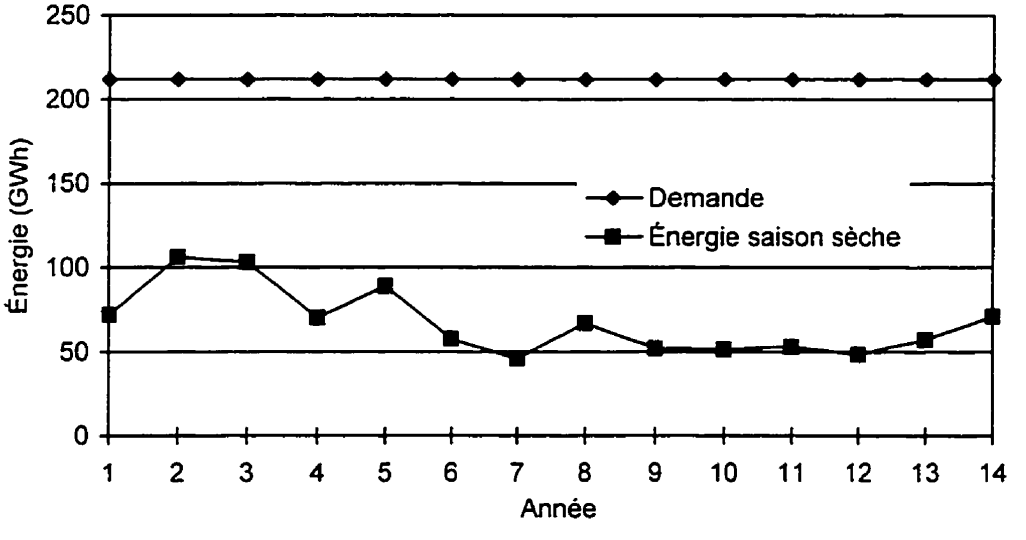



**Figure 5.5: Évolution de la production d'énergie en saison sèche**

Tel que montre la figure 5.5, la production d'énergie en saison sèche varie de 21% (année de faible hydraulicité) à 50% (année de forte hydraulicité) de la demande saisonnière égale à 212 GWh.

Ainsi, un déficit toujours au-dessus de 50% de la demande en saison sèche, peut-il expliquer le fait que même en année forte (année 2), la demande annuelle totale ne soit jamais atteinte? Un élément de réponse se dégage de l'étude des figures 5.6 et 5.7. Elles représentent l'évolution de l'emmagasinement du réservoir durant deux années consécutives de sécheresse. On remarque qu'au cours de la transition an7-an8, le réservoir reste plein et déverse pendant 25 des 52 semaines de cette année hydrologique de faibles apports naturels. L'année hydrologique débute approximativement à la semaine 28. Ceci confirme que la capacité de régularisation du réservoir est très faible. En effet, les résultats simulés de l'exploitation du réservoir montrent que la retenue est toujours pleine en début de saison sèche. La petitesse de la retenue, ne permettant pas une réserve suffisante en eau, explique que des déficits considérables sur la production d'énergie en saison sèche s'observent tous les ans.

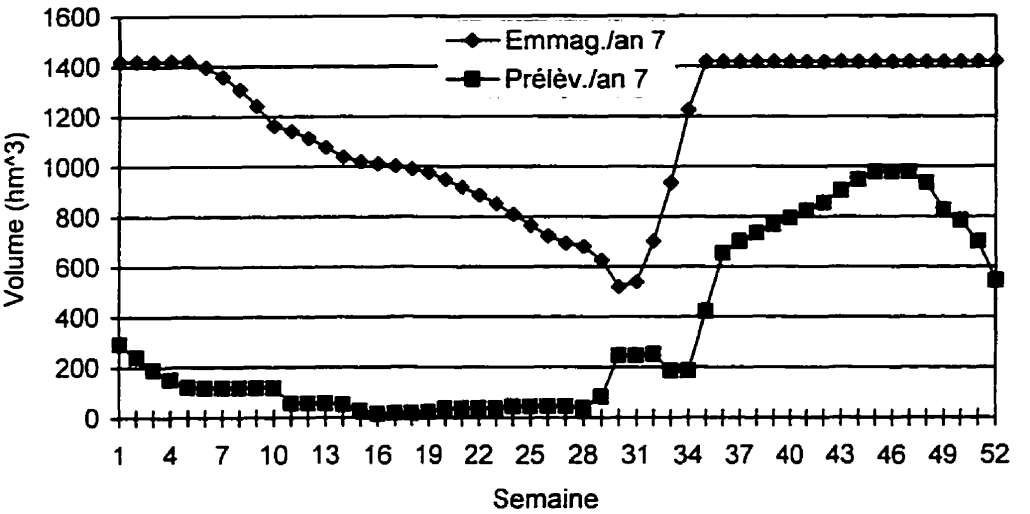



**Figure 5.6: Évolution des prélèvements et de l'emmagasinement à l'année 7**

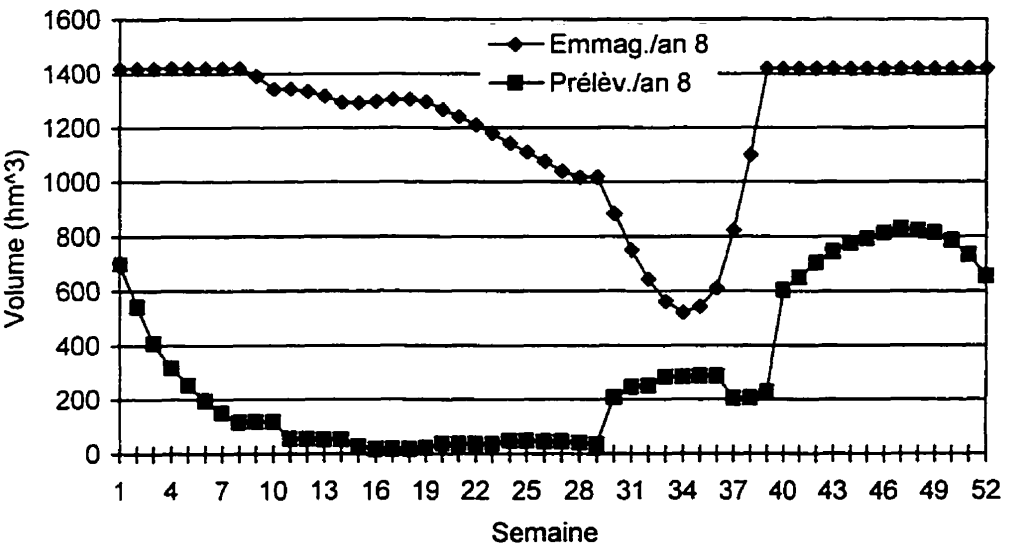



**Figure 5.7: Évolution des prélèvements et de l'emmagasinement à l'année 8**

### 5.3.2 Satisfaction de la demande agricole

La demande en eau des périmètres avals B, C, D et E situés à l'aval de la centrale hydroélectrique est satisfaite à chaque campagne et chaque année leur production maximale est atteinte. Les déficits en eau d'irrigation n'affectent que le périmètre A dont la productivité varie de 83% à 89% en saison sèche et de 88% à 92% en saison humide (tableau 5.6).

**Tableau 5.6: Production agricole du périmètre A en pourcentage de la productivité maximale**

| Année | Production saison sèche | Production saison humide | Production annuelle |
|---|---|---|---|
| 1 | 89 | 92 | 90.5 |
| 2 | 88 | 90 | 89 |
| 3 | 88 | 88 | 88 |
| 4 | 86 | 88 | 87 |
| 5 | 88 | 88 | 88 |
| 6 | 86 | 88 | 87 |
| 7 | 83 | 88 | 85.5 |
| 8 | 88 | 88 | 88 |
| 9 | 84 | 88 | 86 |
| 10 | 84 | 88 | 86 |
| 11 | 84 | 88 | 86 |
| 12 | 84 | 88 | 86 |
| 13 | 84 | 88 | 86 |
| 14 | 86 | 90 | 88 |
| Moyenne | 85.9 | 88.6 | 87.2 |

En saison sèche, les déficits se produisent au cours du second tiers de la montaison et durant la maturation. En saison humide, c'est lors de la première partie de la montaison que des déficits en eau d'irrigation au périmètre A se produisent.

### 5.3.3 État de l'emmagasinement du réservoir et des autres demandes du système

La demande en eau de la ville de Niamey et le débit réservé sont satisfaits toutes les années, aussi bien en saison sèche qu'en saison humide.

Au plus tard à la semaine 39 de chaque année, le réservoir est plein et entame sa descente au plus tôt à la semaine 6 de l'année suivante; cela confirme l'hypothèse posée à la section 4.2.7, sur l'emmagasinement initial du réservoir. Entre deux années fortes, le réservoir pourrait demeurer plein de la semaine 31 jusqu'à la semaine 18 de l'année suivante, ce qui montre encore sa faible capacité de retenue comparativement aux débits transités par le fleuve à Kandadji.

Dans toutes les simulations, l'évolution du niveau du réservoir confirme aussi les hypothèses posées sur les valeurs de chute moyenne, en dehors de quelques semaines où l'emmagasinement du réservoir est descendu hors de la zone cible. La figure 5.8

montre l'emmagasinement le plus bas atteint chaque année et la semaine correspondante. Sur les 728 semaines simulées, le système a enregistré 4 fois un déficit sur l'emmagasinement du réservoir: trois fois à la semaine 29 et une fois à la semaine 28. Le niveau inférieur de la zone cible est atteint ou violé toujours 3 à 10 semaines après le début de l'année hydrologique. En année forte, ce niveau est atteint plus tôt, légèrement plus tard en année moyenne, et beaucoup plus tard en année faible.

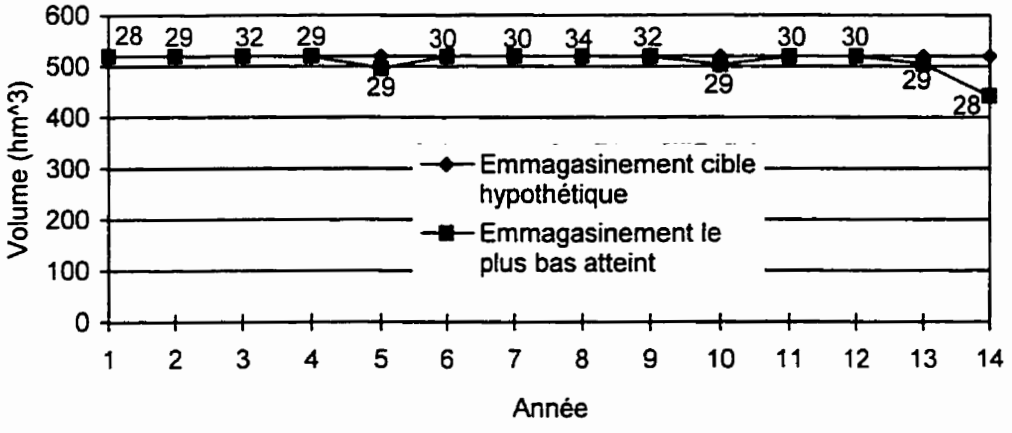



**Figure 5.8: Emmagasinement le plus bas atteint et la semaine correspondante**

Ainsi, le système a tendance à retarder la vidange du réservoir en fonction du temps de remontée de l'hydrogramme des apports au dessus d'un certain seuil. La demande est identique à toutes les années simulées, de même que le vecteur de coefficients de pénalité imposé; de ce fait, la vidange du réservoir sera surtout fonction de l'hydraulicité. Le modèle détermine le moment optimal de vidange du réservoir, les apports ultérieurs étant connus, en particulier lorsqu'ils sont au-dessus d'un certain

seuil en regard de la demande globale du système durant les premières périodes de l'année hydrologique.

Le comportement du système montre qu'il n'est pas nécessaire, au cours de l'exploitation annuelle, d'imposer un emmagasinement cible à la fin de la saison sèche, car le modèle est capable de gérer l'évolution du niveau du réservoir uniquement en fonction du vecteur de coefficients de pénalité et de l'hydraulicité. En effet, il faut remarquer qu'on pourrait, en ne fixant pas d'emmagasinement cible, empêcher le réservoir de descendre sous son niveau minimum en imposant une très forte pénalité sur le déficit de l'emmagasinement. À la fin de la saison humide, le réservoir étant toujours plein, l'imposition d'un emmagasinement cible ne serait que superflu.

## 5.4 Conclusion

L'hydraulicité ne permet pas d'équilibrer avec le réservoir de Kandadji la production d'électricité. En saison sèche, les apports sont tels que la production hydroélectrique est réduite considérablement. Par contre, durant la saison humide on peut produire une quantité importante d'énergie, d'où le niveau d'équipement proposé pour la centrale.

Les périmètres agricoles à l'aval ne sont pas en conflit avec la production hydroélectrique et le niveau suggéré de développement semble justifié du point de vue du développement durable.

# CHAPITRE VI: CONCLUSION

Ce chapitre résume les contributions principales de cette recherche et, en prospective, énumère quelques avenues de travail qu'il apparaît opportun d'explorer.

## 6.1 Contributions principales de la recherche

L'exploitation des systèmes hydriques en périodes de pénurie présente des particularités propres, nécessitant le développement de méthodes adaptées d'analyse et la mise au point d'outils de calcul pour aider les gestionnaires à la résolution du problème d'allocation de l'eau entre plusieurs utilisateurs. Cette thèse contribue dans cette voie, ayant exploré une méthode d'exploitation d'un système hydrique en terme des déficits et des surplus estimés par rapport à des valeurs cibles. Cette approche à la formulation du problème d'allocation de l'eau entre plusieurs utilisateurs est particulièrement intéressante pour étudier les situations de pénurie en périodes d'étiage sévère ou de sécheresse.

La méthode mise au point représente formellement l'exploitation d'un système hydrique sous la forme d'un réseau. Elle rend possible la représentation des fonctions d'un système hydrique par des noeuds et des arcs. Ces fonctions sont l'emmagasinement d'eau dans un réservoir, la production hydroélectrique, les

déversements d'eau du réservoir, le transport de l'eau par un cours d'eau, un canal ou une conduite, et l'alimentation en eau pour fins municipale, industrielle et agricole. Le réseau planaire est constitué des noeuds et arcs représentant, à chaque pas de temps, les fonctions élémentaires du système hydrique. Les paramètres des arcs représentent les caractéristiques physiques et opérationnelles du système étudié. Chaque arc a trois paramètres: les limites inférieure et supérieure du flot qu'il peut transiter, le coefficient de coût pour transiter une unité de flot. L'agencement spatial des ouvrages constitutifs du système est modélisé par la connectivité des noeuds qui en supportent les fonctions particulières.

Dans cette recherche doctorale, ce modèle réseau a été appliqué à l'étude de systèmes hydriques soumis à des pénuries ou à des sécheresses chroniques. Ce modèle s'avère particulièrement bien adapté pour formuler le problème de l'allocation d'eau entre des utilisateurs en terme de déficits et de surplus définis par rapport à des demandes cibles.

Les principales contributions de ce travail sont:

1. Une analyse théorique de la représentation par un réseau de l'exploitation d'un système hydrique, analyse qui a conduit à un formalisme de représentation de fonctions élémentaires;
2. Une application à la gestion d'un système hydrique en périodes de pénurie;

3. Une comparaison de trois vecteurs de coefficients de coûts (pénalité) et de leurs répercussions sur les productions agricole et hydroélectrique, comparaison qui a conduit à identifier un vecteur définissant la stratégie la plus satisfaisante entre ces deux fins principales du système;
4. Une évaluation de la faisabilité du système proposé à Kandadji sur le fleuve Niger en terme du développement durable du territoire qui supporte les activités socio-économiques de la région.

### 6.1.1 Résultats de l'analyse théorique

Le modèle réseau de l'exploitation d'un système hydrique est très bien adapté pour une formulation en terme des déficits et des surplus mesurés par rapport à des demandes cibles. Ce modèle demeure déterministe et linéaire, et contraint par les mêmes limitations que la programmation linéaire. Le cas de la production hydroélectrique demande de spécifier a priori la hauteur de chute à chaque période, ce qui se fait itérativement, pour linéariser l'équation de puissance. Par contre, ce modèle facilite la représentation de fonctions de pénalité non linéaires par création d'autant d'arcs de déficit et de surplus qu'il est nécessaire pour décrire finement chaque fonction de pénalité.

Un formalisme a été développé pour aider à modéliser l'exploitation d'un système hydrique par un réseau planaire de noeuds et d'arcs. Sept types d'arcs élémentaires ont ainsi été définis, qui permettent de représenter les fonctions élémentaires d'exploitation et leurs caractéristiques fonctionnelles.

La méthode de résolution choisie est l'algorithme dit "out-of-kilter". Utilisant cet algorithme, un modèle spécifique au projet de Kandadji a été développé, résolvant le problème de flot au coût minimum dans un réseau. Notons que d'autres algorithmes de programmation linéaire adaptés aux réseaux, pourraient être utilisés pour trouver la solution optimale du problème formulé selon le modèle réseau. C'est le cas puisque ce modèle en est un de programmation linéaire.

Le modèle réseau exprimé en terme de déficit et de surplus fournit une alternative des plus intéressantes à la programmation linéaire classique pour l'étude de l'exploitation d'un système hydrique en périodes de pénurie. Il présuppose que les demandes cibles et niveaux cibles de l'eau dans les réservoirs sont connus. Une fois disponibles ces valeurs, le modèle réseau identifie la meilleure stratégie d'exploitation. Ce modèle couplé à d'autres permet d'étudier la gestion d'un système hydrique et d'en bien appréhender les caractéristiques de comportement. Le modèle réseau est ainsi jugé prometteur pour l'étude des systèmes hydriques localisés en zones de sécheresses chroniques.

### 6.1.2 Application au système hydrique proposé à Kandadji

Le modèle réseau a servi à la formulation du problème de l'exploitation optimale du système de Kandadji au Niger, système dont les caractéristiques ont été définies par un avant-projet détaillé, mais qui n'a pas encore été réalisé. Un outil de calcul a été mis au point, le modèle KANDOKA, pour résoudre le modèle réseau de l'exploitation de ce système hydrique particulier.

Diverses études ont été complétées pour valider la formulation réseau, pour appréhender le comportement de ce système en période d'hydraulicité moyenne et sèche, pour vérifier l'influence du choix des types d'arc sur la stratégie d'exploitation, et surtout pour aider le décideur à choisir un vecteur de coefficients de pénalité représentatif des objectifs d'exploitation poursuivis.

Ces études ont confirmé que le modèle réseau est adapté à l'exploitation d'un système hydrique, particulièrement en périodes de pénurie. Elles ont aussi explicité le comportement du système en période d'hydraulicité moyenne et faible en période sèche, indiquant notamment le peu de différence entre les deux. Ce comportement prévisible à l'analyse des séquences d'apports naturels, s'est confirmé par les analyses numériques réalisées.

La taille de la réserve active du réservoir de Kandadji est petite et ne permet pas une régularisation annuelle des apports naturels. Cette réserve, rapidement remplie au début de la saison humide, ne permet pas d'emmagasiner une proportion significative des apports naturels de la saison humide pour augmenter les volumes d'eau disponibles en saison sèche. Ceci explique la grandeur des déficits à la production d'énergie durant la saison sèche, qui connaît des déficits considérables en raison du faible pouvoir de régularisation de la retenue. En saison humide, la production d'énergie est assez importante pour rencontrer entièrement la demande, ce qui justifie d'ailleurs la capacité d'équipement de l'usine hydroélectrique.

Les études ont aussi montré l'importance du choix des coefficients de pénalité dans la recherche d'une stratégie d'exploitation. Par le choix d'un ensemble de coefficients, le gestionnaire oriente les solutions dans des directions privilégiées qu'impliquent les grands objectifs de l'exploitation du système. Le choix de ces coefficients, souvent très nombreux, n'est pas un exercice trivial à cause de l'interdépendance entre les variables de décision et des contraintes auxquelles elles sont soumises. C'est un exercice par essais successifs qui se termine quand une stratégie d'exploitation satisfaisante en regard des objectifs poursuivis est obtenue.

Dans cet exemple d'application du modèle réseau, la production hydroélectrique n'est pas en conflit avec les demandes en eau à l'aval de la centrale hydroélectrique. Seule

la demande en eau du périmètre A, dont les eaux d'irrigation sont prélevées directement du réservoir, est conflictuelle avec la production hydroélectrique. Le débit réservé à la frontière avec le Nigéria entre en conflit avec les demandes en eau d'irrigation et de la capitale Niamey lorsque sa valeur dépasse, en saison sèche. 30 $m^3/s$.

### 6.1.3 Comparaison des vecteurs de pénalité

Trois vecteurs de pénalité ont été comparés en terme de leurs répercussions sur la production agricole et la production hydroélectrique. Cette dernière est directement obtenue des solutions numériques du modèle KANDOKA. La production agricole, exprimée en pourcentage de la production qui serait obtenue s'il n'y avait aucun déficit en eau d'irrigation, est estimée en tenant compte du moment où un déficit se produit en suivant le principe de Boulé. Cette estimation se fait a posteriori sur la base des résultats du modèle KANDOKA.

La comparaison se fait ainsi sur des variables de décision agrégées qui ont une signification pour le gestionnaire. Lorsque les productions agricole et hydroélectrique sont portées en graphique, à chaque vecteur correspond un point. En comparant gains et pertes relatives entre deux points, le gestionnaire est à même de bien saisir les répercussions de l'un par rapport à l'autre. De tels graphiques servent dans les

analyses de décision multicritère et ils ont servi dans ce travail à identifier le vecteur le plus satisfaisant à imposer au modèle KANDOKA.

### 6.1.4 Faisabilité du système proposé en environnement durable

Cette faisabilité a été évaluée en gérant, sur une base annuelle, le système proposé dans le rapport d'avant-projet pour chacune des années d'observation des séquences d'apports naturels à Kandadji. Les prélèvements et allocations d'eau sont déterminés par le modèle KANDOKA et les productions agricoles estimées des résultats qu'il produit. Un tableau des productions annuelles ou par saison est ainsi obtenu, indiquant le pourcentage d'atteinte de la production maximale du système en absence de déficit. Ces tableaux montrent que le système proposé est compatible avec un développement durable du territoire. Pour tous les périmètres à l'aval du réservoir, la superficie cultivable peut toujours être irriguée; par contre, la superficie du périmètre A pourrait être réduite de 10% afin d'assurer la production maximale avec une très grande fiabilité. En regard de la production hydroélectrique, il faut distinguer les résultats en fonction de la saison. En saison humide, la demande en énergie est toujours satisfaite; en saison sèche, la production d'énergie varie toujours entre 25% et 50% de la demande.

Cette approche à l'évaluation de la faisabilité d'un système hydrique en environnement durable est intéressante et, exprimée en terme des productions que le système supporte, est utile au gestionnaire décideur.

## 6.2 Perspectives de travail futur

Les travaux accomplis et les résultats obtenus ouvrent de nouvelles avenues de recherche pour l'exploitation d'un système hydrique.

Le modèle réseau s'avère intéressant comme base à la formulation du problème d'exploitation. Ce modèle a été validé pour un système à fins multiples dont les caractéristiques n'ont pas permis d'intégrer toutes les combinaisons d'arcs élémentaires. Toutes les possibilités du modèle réseau, appliqué à l'exploitation d'un système hydrique n'ont pu être testées et validées par un cas d'étude. Ainsi, la subdivision d'un réservoir en plusieurs zones d'exploitation n'a pas été testée tout comme l'inclusion d'ouvrages tels que stations de pompage ou de purification. Il serait donc opportun de poursuivre l'application de ce modèle à d'autres systèmes hydriques pour compléter l'évaluation du modèle réseau. Il serait aussi opportun d'évaluer ce modèle pour des systèmes hydriques formés de plusieurs réservoirs et pour des systèmes dont les réservoirs fournissent une régularisation annuelle ou multiannuelle des apports naturels.

Dans ce travail, il a été supposé que les demandes et les niveaux cibles étaient connus. Déterminer ces valeurs cibles, en particulier les niveaux cibles des réservoirs, demeure un sujet de recherche. Il serait intéressant d'étudier le potentiel du modèle réseau, utilisé dans une stratégie à mettre au point, comme aide à la détermination de ces valeurs cibles et ce dans le contexte du développement durable.

Il apparaît aussi opportun d'utiliser ce modèle dans une stratégie de type 1 pour adapter les prélèvements et les allocations aux conditions évolutives du système tout au long d'une saison ou d'une année. L'utilisation de cet outil de calcul pourrait avantageusement être couplée à un modèle de prévisions des apports naturels pour améliorer le mode d'exploitation dynamique du système hydrique.

En regard du système hydrique de Kandadji, il apparaît opportun d'étudier une variante ayant un plus grand potentiel de régularisation des apports. La même étude pourrait aussi déterminer les impacts qu'auraient sur l'aménagement du territoire, la majoration du débit réservé à la frontière du Nigéria et l'imposition de débits minimums dans les différents biefs pour fin de protection environnementale.

## 6.3 Conclusion générale

Les travaux effectués dans cette thèse, constituent un apport additionnel et appréciable au développement des méthodes de gestion des systèmes hydriques, en mettant l'accent sur l'exploitation de tels systèmes en périodes de pénurie. L'approche réseau a été adaptée au contexte d'exploitation en pénurie, en développant un formalisme de représentation d'un système hydrique par des noeuds et des arcs permettant de gérer le problème d'allocation de l'eau explicitement en terme de déficits et de surplus évalués par rapport à une demande cible. La méthode proposée est validée et évaluée par l'outil de calcul KANDOKA, mis au point et appliqué à l'exploitation d'un système hydrique à fins multiples, celui de Kandadji. Les résultats dégagés montrent que l'approche réseau utilisée constitue une alternative intéressante aux formulations classiques de l'exploitation des systèmes hydriques; ces résultats ont aussi permis de caractériser le comportement du système Kandadji et de valider la compatibilité entre le niveau de développement envisagé pour ce projet et le développement durable.

## Références

**AHUJA, R.K., MAGNANTI, T.L., ORLIN, J.B.** (1993). Out-of-kilter algorithm. Network flows: theory, algorithms and applications, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 326-332.

**BAZARAA, M.S., JARVIS, J.J.** (1977). Linear programming and network flows, John Wiley & Sons, N.Y.

**BILLON, B.** (1985). Le Niger à Niamey: décrue et étiage. Cahiers ORSTOM, Service Hydrologie, 21(4), 3-22.

**BRENDECKE, C.M., DE OREO, W.B., PAYTON, E.A., ROZAKLIS, L.T.** (1989). Network models of water rights and system operations. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 115(5), 684-696.

**BRUNET-MORET, Y., CHAPERON, P., LAMAGAT, J.P., MOLINIER, M.** (1986). Monographie hydrologique du fleuve Niger. Tome 2: Cuvette Lacustre et Niger Moyen, Collection Monographies Hydrologiques, 8, Éditions de l'ORSTOM, Paris.

**CHUNG, F.I., ARCHER, M.C., DE VRIES, J.J.** (1989). Network flow algorithm applied to California Aqueduct simulation. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 115(2), 131-147.

**DOORENBOS, J., KASSAM, A.H.** (1979). Yield Response to Water, F.A.O. Irrigation and Drainage Paper, 33.

**FULKERSON, D.R.** (1961). An out-of-kilter method for minimal cost flow problems. Journal of The Society of Industrial and Applied Mathematics, 9(1), 18-27.

**GOICOECHEA, A., HANSEN, D.R., DUCKSTEIN, L.** (1982). Multiple Objective Decision Making with Engineering and Business Applications, John Wiley & Sons, New York, New York.

**GUERRERO-ACOSTA, A.** (1989). L'évaluation des risques de défaillance dans l'exploitation des systèmes hydriques. Mémoire de Maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Canada.

**HAIMES, Y.Y., HALL, W.A.** (1974). Multiobjective in Water Resources Systems Analysis: The Surrogate Worth Trade-Off Method. Water Resources Research, 10(4), 615-624.

**HARBOE, R.** (1992). M.O.D.M. techniques for reservoir operation. AWRA Water Resources Bulletin, 28(1), 103-110.

**HASHIMOTO, T., STEDINGER, J.R., LOUCKS, D.P.** (1982). Reliability, resiliency and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. Water Resources Research, 18(1), 14-20.

**HWANG, C.L., MASUD, A.S.M.** (1979). Multiple objective decision making methods: a state-of-the-art survey, Springer-Verlag.

**JENSEN, P.A., BARNES, J.W.** (1980). The out-of-kilter algorithm. Network flow programming, John Wiley & Sons, New York, New York, 205-230.

**KENNINGTON, J.L., HELGASON, R.V.** (1980). Algorithms for network programming, John Wiley & Sons, New York, New York.

**LOUCKS, D.P., STEDINGER, J.R., HAITH, D.A.** (1981). Water Resources Systems Planning and Analysis, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.Y.

**MAHE, G., OLIVRY, J.C.** (1995). Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale de 1951 à 1989. Sécheresse, 6(1), 109-117.

**MAMADOU ABDOU, H.** (1995). Rapport de recherche complémentaire sur le système hydrique de Kandadji au Niger, Rapport de recherche, École Polytechnique de Montréal, Canada.

**MAMADOU ABDOU, H., SEINI MODI, S.** (1993). Typologies des méthodes d'analyse multicritère, Rapport de recherche, École Polytechnique de Montréal, Canada.

**MÉJIA, J.M., ÉGLI, P., LECLERC, A.** (1974). Evaluating multireservoir operating rules. Water Resources Research, 10(6), 1090-1098.

**NICHOLSON, S.E., KIM, J., HOOPINGARNER, J.** (1988). Atlas of African Rainfall and its Interannual Variability, Tallahassee Florida State University.

**PRASHAR, C., BERRADA, A.** (1992). Évaluation des pertes d'eau dans les barrages de la zone sahélienne au Niger. Atelier sur l'eau en zone sahélienne, organisé du 13 au 16 avril 1992 à Niamey par l'Université de Niamey, le CRDI et l'UQAM.

**SABET, H., CREEL, C.L.** (1991). Network flow modeling of Oroville complex. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 117(3), 301-320.

**SAS INSTITUTE INC.** (1985). The NETFLOW Procedure. SAS/OR User's Guide, Version 5 Edition, SAS Institute Inc., Cary, N.C., 211-223.

**SIGVALDASON, O.T.** (1976). A simulation model for operating a multipurpose multireservoir system. Water Resources Research, 12(2), 263-278.

**SIRCOULON, J.** (1990). Aspects hydrologiques des fluctuations climatiques en Afrique de l'Ouest et Centrale. Bulletin de l'Organisation Météorologique Mondiale, 380, 1-8.

**SOFRELEC** (1980). Dossier de factibilité. Étude de factibilité du barrage de Kandadji, SOFRELEC, Paris.

**SOFRELEC, SATEC** (1977). Étude des possibilités d'irrigation. Étude de factibilité du barrage de Kandadji, SOFRELEC & SATEC, Paris.

**TECLE, A.** (1992). Selecting a multicriterion decision making technique for watershed resources management. AWRA Water Resources Bulletin, 28(1), 129-140.

**TREMBLAY, M.** (1989). Gestion du risque dans l'exploitation des systèmes hydriques. Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, Canada.

**WURBS, R.A.** (1993). Reservoir-system simulation and optimization models. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 119(4), 455-472.

**YEH, W.W-G.** (1985). Reservoir management and operation models: a state-of-the-art review. Water Resources Research, 21(12), 1797-1818.

# Annexe A

Format des données d'entrée au modèle KANDOKA

et des fichiers de résultats

Les données d'entrée au modèle KANDOKA et les résultats produits sont organisées en fichiers pouvant apparaître sur écran ou être imprimés sous forme de tableaux, matrices, textes ou graphiques.

**Fichiers de soumission du programme GENER**

Cette catégorie de fichiers est constituée de données sous la forme de matrices. Ils sont répertoriés et rattachés au support informatique d'utilisation du modèle KANDOKA. Ils sont identifiés par le genre d'étude. L'hydraulicité et le vecteur de coefficients de pénalité utilisé sont indiqués en extension. À chaque étude correspond un fichier renfermant toutes les données du cas d'exploitation analysé. Par exemple, le fichier BASEQR60.MOYC1 correspond à l'étude de l'influence du rehaussement du débit réservé à 60 $m^3/s$ dans le scénario de base sous une année moyenne avec le vecteur C1.

Pour chaque genre d'étude, des fichiers peuvent être saisis d'avance. Cela fait épargner le temps de saisie des données surtout pour la préparation de longues simulations. En temps opportun, selon les données exactes d'une étude, il n'y a qu'à réajuster quelques unes d'entre elles tels que les apports.

**Fichiers-résultats**

Ce type de fichiers représente le résultat de chaque étude sous la forme matricielle du vecteur de flot optimal. Ces fichiers sont également identifiés et regroupés dans un répertoire de l'environnement informatique d'utilisation du modèle KANDOKA. Les fichiers-résultats sont sauvegardés de manière qu'il n'est possible que de les consulter ou les imprimer. Il ne sont pas accessibles sous un éditeur afin de les protéger d'une modification par erreur de manipulation.

**Fichiers de compilation des résultats**

Les résultats de chaque étude sont traités à l'aide du chiffrier Microsoft Excel, et compilés dans un fichier composé de plusieurs feuilles de calcul. Chaque feuille de calcul présente un type de résultat sous la forme de tableaux ou de graphiques accompagnés d'un texte de commentaires. Une feuille de calcul contient le type de résultat suivant:

. l'évolution des prélèvements ou de l'emmagasinement du réservoir,

. l'évolution de la production d'énergie,

. la production agricole,

. les compromis possibles entre les niveaux de production selon le vecteur de coefficients de pénalité,

. les niveaux de production selon l'hydraulicité.

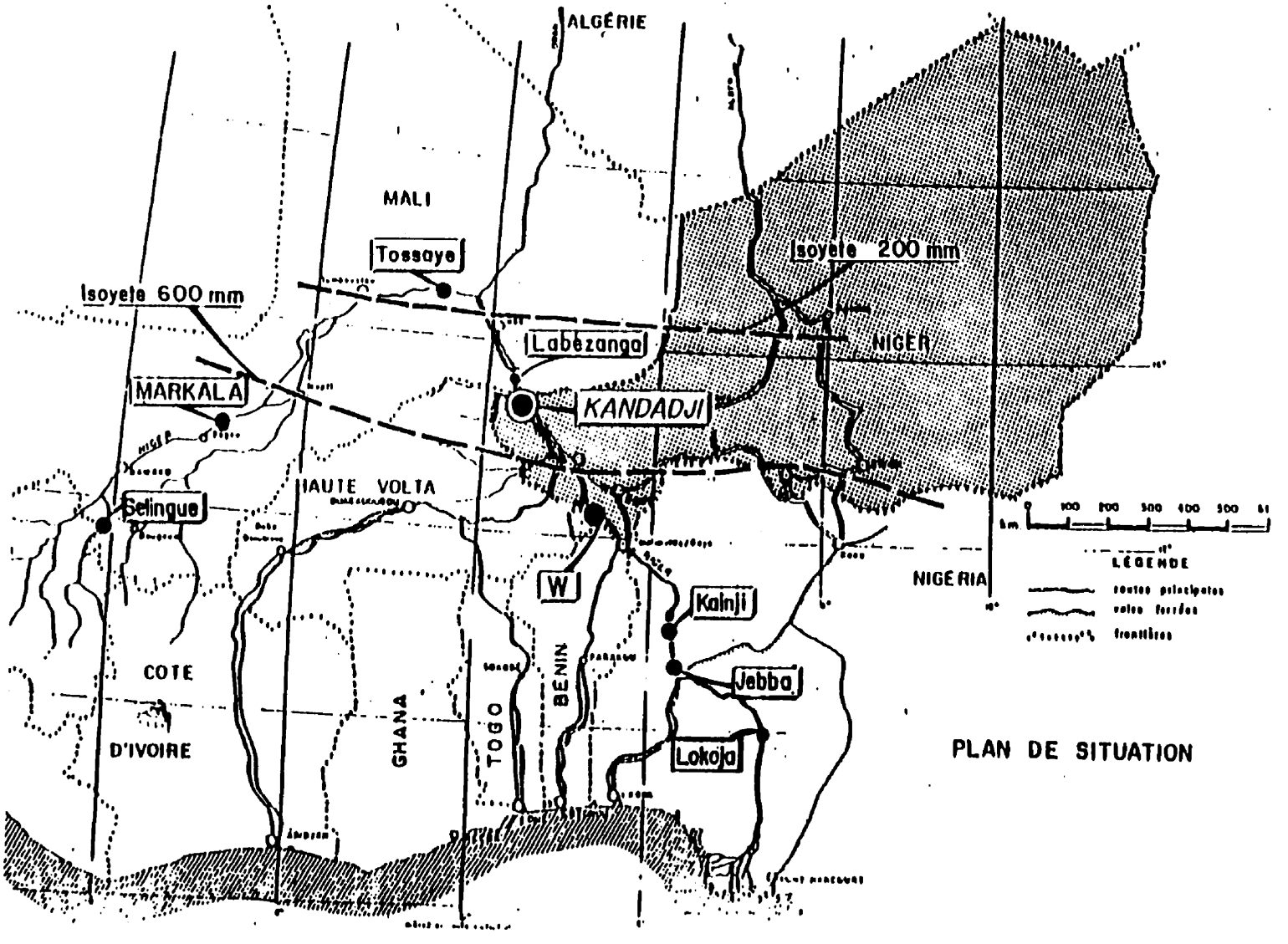
Tous ces fichiers Excel sont contenus dans un répertoire et sont exploitables sur un micro-ordinateur.

## Annexe B

. Plan de situation géographique du système hydrique de Kandadji

sur le fleuve Niger

. Résumé des principales caractéristiques de l'aménagement de Kandadji




PLAN DE SITUATION

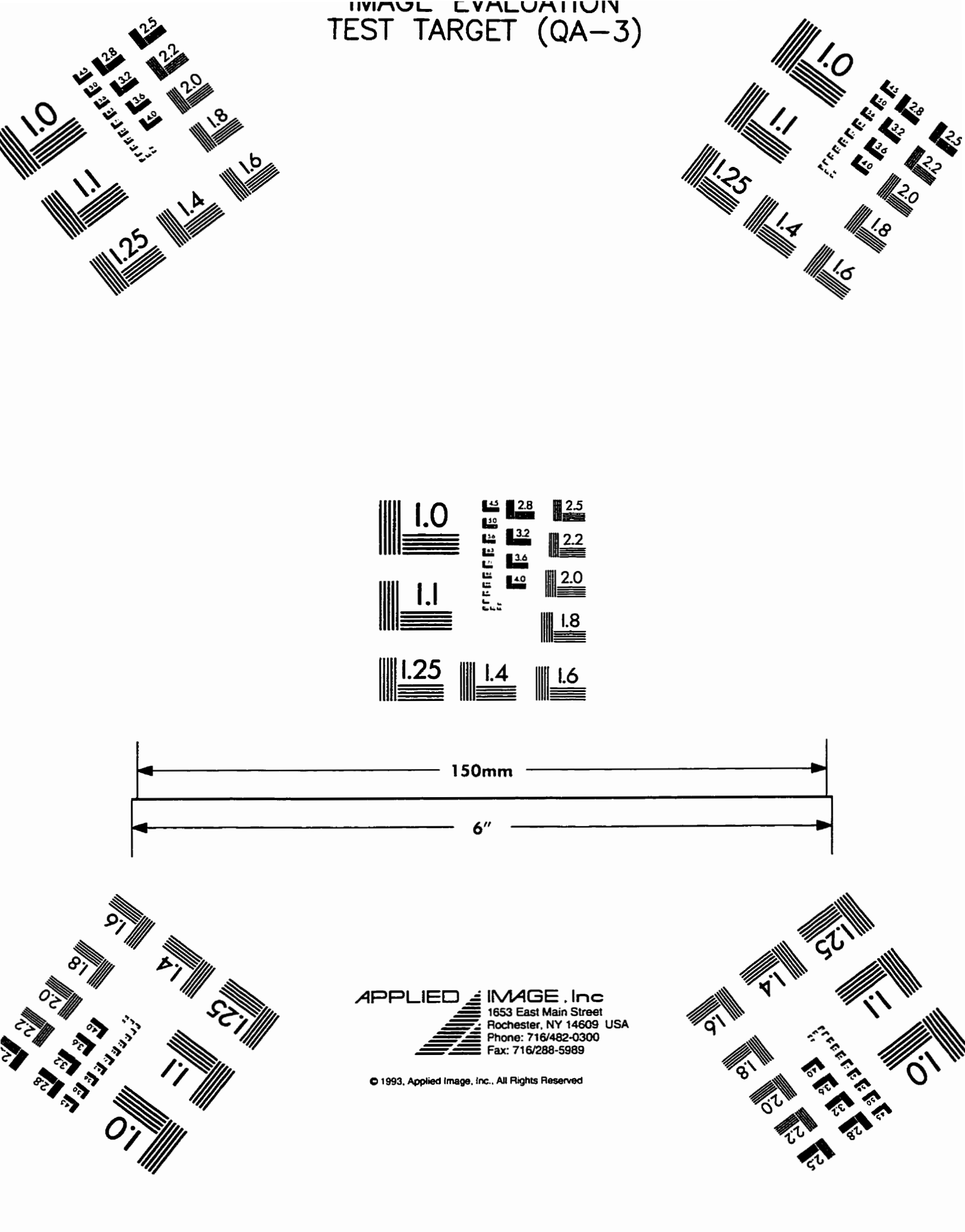


IMAGE EVALUATION
TEST TARGET (QA-3)
1.0
1.1
1.25
1.4
1.6
1.8
2.0
2.2
2.5
2.8
3.2
3.6
4.0
150mm
6"
APPLIED IMAGE, Inc
1653 East Main Street
Rochester, NY 14609 USA
Phone: 716/482-0300
Fax: 716/288-5989
© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved