

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

Mémoire

présenté

à

l'Institut national de la recherche scientifique

comme exigence partielle

de la

Maîtrise es sciences (eau)

par

Gilles Brunet

B.Sc. Biologie

Nicole Saint-Pierre

B.Sc. Mathématiques

Développement du graphe de cohérence et application
au projet de harnachement de la rivière Chamouchouane

Mai 1983

"Une action est conforme à la raison lorsqu'elle connaît ses conditions préalables, lorsqu'elle prévoit ses propres conséquences et lorsqu'elle est consciente des motivations qui ont dicté ses objectifs".

(Picht, 1970)

RÉSUMÉ

Suite à une revue de la littérature, nous avons identifié un grand nombre de méthodes d'évaluation d'impact. Cependant, notre intérêt s'est porté plus spécifiquement sur la méthode du graphe de cohérence. Son application, dans le cadre de l'identification et de l'évaluation des impacts d'un projet, s'est toutefois avérée problématique. En effet, les notions de cohérence et d'indépendance simultanées des éléments d'un même niveau, sont apparues limitantes en ce qui a trait à la quantité d'information transmise par le graphe. Une modification d'ordre structurel du graphe nous a permis d'éliminer ce problème et de faciliter la consultation du graphe.

Nous avons également établi, à l'aide des langages graphique et matriciel, des règles mathématiques fixes afin de bien définir le graphe de cohérence. Ces règles nous ont permis la création d'algorithmes afin de faciliter l'interprétation du graphe de cohérence (ex.: la méthode de la dynamique polyédrale).

Finalement, nous avons appliqué la méthode du graphe de cohérence ainsi modifiée à un cas concret, en l'occurrence, le projet d'harnachement de la rivière Chamouchouane à des fins de production hydro-électrique. À ce niveau, nous avons toutefois limité l'identification des impacts aux composantes de la faune aquatique de la rivière Chamouchouane.

REMERCIEMENTS

Nous remercions d'une manière très particulière, notre directeur de thèse le Docteur Denis Couillard, qui, par ses judicieux conseils et par sa grande disponibilité, nous a permis de mener à bien le présent travail.

Nous remercions également, monsieur Yves Grimard du Ministère de l'environnement du Québec et monsieur Charles Cassidy, professeur à l'Université Laval pour l'aide qu'il nous ont apporté lors de la conception de la partie mathématique. De même, nous remercions messieurs Jean-Robert Sabourin et Claude Lemay de la Société Hydro-Québec ainsi que monsieur René Lesage du ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche pour les nombreux points d'information qu'ils nous ont fournis.

Enfin, un merci très sincère à monsieur André Parent, dessinateur et madame Lise Raymond, secrétaire, pour l'excellent travail qu'ils ont accompli lors de la mise en page du présent mémoire.

TABLE DES MATIÈRES

	<u>Page</u>
RÉSUMÉ	i
REMERCIEMENTS	ii
TABLE DES MATIÈRES	iii
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES SYMBOLES STANDARDS	xii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Les méthodes d'évaluation d'impact	2
1.1.1 Liste de contrôle	2
1.1.2 Matrice	3
1.1.3 Méthodes cartographiques	6
1.1.4 Réseau	6
CHAPITRE 2 LE GRAPHE DE COHÉRENCE	9
2.1 Nécessité d'une méthode "universelle"	10
2.2 Règles actuelles et problème d'application	11
2.3 Modifications proposées et nouvelles règles	13
2.3.1 Éléments structuraux du graphe	13
2.3.2 Interrelations	17

	<u>Page</u>
CHAPITRE 3 DÉFINITION MATHÉMATIQUE ET TECHNIQUES D'INTERPRÉ- TATION DU GRAPHE DE COHÉRENCE	19
3.1 Description graphique du graphe de cohérence	21
3.1.1 Graphes	21
3.1.2 Graphe orienté et p-graphe	23
3.1.3 Réflexivité et antisymétrie	23
3.1.4 Chemin et circuit; chaîne et cycle	25
3.1.5 Degré d'un sommet et ordre d'un graphe	30
3.1.6 Connexité	32
3.1.7 Hiérarchie	34
3.1.8 Partition	37
3.1.9 Fonction ordinale	38
3.1.10 Tableaux associés à un graphe	38
3.2 Interprétation du graphe de cohérence à l'aide des matrices	39
3.2.1 Matrice booléenne	39
3.2.1.1 Définition	41
3.2.1.2 Description	42
3.2.1.3 Propriétés	47
3.2.1.4 Utilisation	48
3.2.2 Techniques mathématiques appliquées au graphe de cohérence par l'intermédiaire de la matrice d'incidence	52
3.2.2.1 Méthode de la dynamique polyédrale	53
3.2.2.1.1 Graphes de cohérence à 2 niveaux ...	53
3.2.2.1.2 Adaptation pour les graphes de cohérence à n-niveaux reliés	66
3.2.2.2 Mesure d'importance, définition et interprétation	70
CHAPITRE 4 ÉTUDE D'UN CAS: HARNACHEMENT D'UNE RIVIÈRE À DES FINS HYDRO-ÉLECTRIQUES	74

	<u>Page</u>
4.1 Description du projet	75
4.1.1 Ouvrages de retenue et de régularisation	79
4.1.2 Ouvrages de production hydro-électrique	82
4.1.3 Ouvrages de dérivation	82
4.1.4 Autres détails	84
4.2 Description de la région	84
4.2.1 Géomorphologie du bassin versant	88
4.2.1.1 Hautes Terres	88
4.2.1.2 Basses Terres argileuses	89
4.2.2 Conditions climatiques	91
4.2.3 Hydrologie	92
4.2.3.1 Profil en long	92
4.2.3.2 Débits	92
4.2.3.3 Glaces	94
4.2.4 Qualité de l'eau	94
4.2.5 Faune aquatique	95
4.2.5.1 Plancton	95
4.2.5.2 Benthos	95
4.2.5.3 Ichtyofaune	98
4.2.5.3.1 Peuplements piscicoles ...	98
4.2.5.3.2 Ouananiche	98
 CHAPITRE 5 APPLICATION DU GRAPHE DE COHÉRENCE AU CAS ÉTUDIÉ .	 102
5.1 Identification et description des impacts	103
5.1.1 Phase de construction	103
5.1.1.1 Bloc actions	103
5.1.1.2 Bloc conditions intermédiaires:	
milieu abiotique	106
5.1.1.3 Bloc effets: faune aquatique	109
5.1.2 Phase mise en eau	113
5.1.2.1 Bloc actions	113

	<u>Page</u>
5.1.2.2 Bloc conditions intermédiaires: milieu abiotique	116
5.1.2.3 Bloc effets: faune aquatique	121
5.1.3 Phase exploitation	126
5.1.3.1 Bloc actions	126
5.1.3.2 Bloc conditions intermédiaires: milieu abiotique	128
5.1.3.3 Bloc effets: faune aquatique	135
5.2 Interprétation mathématique des graphes de cohérence	140
5.2.1 Représentation vectorielle des trois graphes	141
5.2.2 Calcul des mesures d'importance	145
5.2.2.1 Mesure d'importance $m(x_j)$	145
5.2.2.2 Mesure d'importance totale $M(x_j)$	146
5.2.3 Interprétation	147
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	153
BIBLIOGRAPHIE	157

LISTE DES TABLEAUX

		<u>Page</u>
1.1	Méthodes appartenant à la catégorie "Liste de contrôle"	4
1.2	Méthodes appartenant à la catégorie "Matrice"	5
1.3	Méthodes appartenant à la catégorie "Méthodes cartographiques"	7
1.4	Méthodes appartenant à la catégorie "Réseau"	8
3.1	Algorithme permettant la construction du graphe de cohérence	51
3.2	Matrice d'incidence A, représentant la relation prédateur-proie L, illustrée à la figure 3.18	56
4.1	Caractéristiques des différents barrages	80
4.2	Caractéristiques des différentes digues	81
4.3	Hauteur de chute aux différents sites	83
4.4	Caractéristiques des galeries de dérivations provisoires	85
4.5	Quantité de matériaux nécessaires à la réalisation du complexe Hydro-Électrique Chamouchouane	86
4.6	Débits moyens mensuels à l'état naturel (m ³ /s) de la rivière Chamouchouane	93

	<u>Page</u>
4.7 Principales espèces zooplanctoniques du bassin de la rivière Chamouchouane	97
4.8 Ichtyofaune du bassin de la rivière Chamouchouane et sections de rivière où on la retrouve	99
5.1 Débits résiduels lors du remplissage des réservoirs .	117
5.2 Régime thermique et positionnement des prises d'eau des différents barrages du complexe de la Chamouchouane	129
5.3 Matrice associée au graphe de cohérence, représentant la phase construction (graphe I). Degré intérieur $[d^-(x_i)]$, mesure d'importance $[m(x_j)]$ et mesure d'importance totale $[M(x_i)]$	150
5.4 Matrice associée au graphe de cohérence, représentant la phase mise en eau (graphe II). Degré intérieur $[d^-(x_i)]$, mesure d'importance $[m(x_j)]$ et mesure d'importance totale $[M(x_i)]$	151
5.5 Matrice associée au graphe de cohérence, représentant la phase exploitation (graphe III). Degré intérieur $[d^-(x_i)]$, mesure d'importance $[m(x_j)]$ et mesure d'importance totale $[M(x_i)]$	152

LISTE DES FIGURES

		<u>Page</u>
2.1	Les éléments structuraux du graphe de cohérence après modifications	14
2.2	Structure du graphe de cohérence après modifications	15
2.3	Illustration de la relation "cause-condition-effet" entre les différentes cases du graphe	18
3.1	Graphe orienté	24
3.2a	3-graphe	24
3.2b	1-graphe	24
3.3	Graphe réflexif	26
3.4	Graphe antisymétrique	26
3.5	Graphe avec chaîne, chemin, cycle et circuit	29
3.6	Graphe de cohérence avec cycles	29
3.7	Degré des sommets	31
3.8	Graphe ayant 2 composantes s-connexes	33
3.9	Graphe ayant 2 composantes f-connexes	33
3.10a	Graphe fortement connexe	35
3.10b	Graphe simplement connexe mais non fortement connexe	35

	<u>Page</u>
3.11	2 graphes de cohérence pour un seul projet; chaque graphe est connexe 35
3.12	Hiérarchie 36
3.13	Matrice booléenne représentant le graphe G 40
3.14	Matrice d'incidence représentant le graphe G 40
3.15	Matrice booléenne M du graphe de cohérence G_c : matrice triangulaire supérieure avec diagonale nulle. 44
3.16	Partition de la matrice booléenne M associée au graphe de cohérence G_c 46
3.17	Degrés intérieurs (d^-) et extérieurs (d^+) à partir de la matrice booléenne M du graphe de cohérence G_c . 49
3.18	Graphe représentant les relations entre les préda- teurs et les proies 56
3.19	Forme géométrique du complexe simplicial $K_Y(X;L)$ correspondant à la matrice d'incidence du tableau 3.2 56
4.1	Harnachement de la rivière Chamouchouane: variante I 77
4.2	Harnachement de la rivière Chamouchouane: variante II 78
4.3	Bassin de drainage de la rivière Chamouchouane et municipalités environnantes 87
4.4	Profil en long de la rivière Chamouchouane 90

	<u>Page</u>
4.5	Variation de la température de l'eau de la rivière Chamouchouane en fonction du temps 96
5.1	Graphe de cohérence des impacts sur la faune aquatique dus à la construction du complexe hydro-électrique de la rivière Chamouchouane 105
5.2	Graphe de cohérence des impacts sur la faune aquatique dus à la mise en eau du complexe hydro-électrique de la rivière Chamouchouane 114
5.3	Calendrier du remplissage des réservoirs des complexes hydro-électrique de la rivière Chamouchouane 115
5.4	Graphe de cohérence des impacts sur la faune aquatique dus à l'exploitation du complexe hydro-électrique de la rivière Chamouchouane 127
5.5	Comparaison entre les débits naturels et régularisés pour la rivière Chamouchouane 132
5.6	Graphe représentant la phase "Construction d'un barrage" 142
5.7	Graphe représentant la phase "Mise en eau d'un barrage" 143
5.8	Graphe représentant la phase "Exploitation d'un barrage" 144

LISTE DES SYMBOLES STANDARDS

- \mathbb{R} : Ensemble des nombres réels
- \mathbb{N} : Ensemble des entiers positifs ou nul
- \mathbb{Z} : Ensemble des entiers positifs, négatifs ou nul
- \emptyset : Ensemble vide
- $|A|$: Cardinalité de l'ensemble A
- $a \in A$: a élément de l'ensemble A
- $a \notin A$: a n'est pas élément de l'ensemble A
- $A \cup B$: Réunion des ensembles A et B
- $A \cap B$: Intersection des ensembles A et B
- $A \subset B$: L'ensemble A est une partie (ou sous-ensemble) de l'ensemble B
- $A \not\subset B$: A n'est pas contenu dans B
- $A \times B$: Produit cartésien de A par B (ensemble des couples (a,b) avec $a \in A$ et $b \in B$)
- $(1) \rightarrow (2)$: La propriété (1) entraîne la propriété (2)
- $(1) \leftrightarrow (2)$: La propriété (1) est équivalente à la propriété (2)
- a_{ij} : Élément de la matrice A à la i-ième rangée et à j-ème colonne
- $\text{Det}(A)$ ou $D(A)$: Déterminant de la matrice A

- CH₁: Premier barrage du complexe hydro-électrique de la rivière Chamouchouane (aval)
- CH₂: Deuxième barrage du complexe hydro-électrique de la rivière Chamouchouane
- CH₃: Troisième barrage du complexe hydro-électrique de la rivière Chamouchouane
- CH₄: Quatrième barrage du complexe hydro-électrique de la rivière Chamouchouane (amont)

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

À l'exemple des États-Unis, le gouvernement du Québec instaurait en 1972 un régime général de protection de l'environnement en adoptant la loi sur la qualité de l'environnement (Anonyme, 1979). L'adoption de cette loi par les autorités de l'état était l'aboutissement logique d'une conscientisation grandissante de la population face à la protection de son milieu de vie. En 1978, la loi subissait certaines modifications (Leclerc et al., 1979) visant entre autres à renforcer les mesures de prévention. C'est à ce moment que fût mise en place la procédure d'examen et d'évaluation des impacts sur l'environnement.

Les objectifs visés par cette procédure se définissent comme suit: permettre aux promoteurs d'intégrer la notion environnementale à la conception des projets; renseigner le public relativement à l'action projetée et lui donner l'occasion d'émettre son avis; enfin, fournir au décideur l'information nécessaire pour qu'il puisse prendre une décision éclairée quant à l'autorisation de l'action proposée (Anonyme, 1982).

La multiplicité des objectifs de cette nouvelle approche, couplée à la complexité de la procédure d'examen et d'évaluation des impacts, force les promoteurs à agir avec méthode et rigueur lors de la conception d'un projet. L'utilisation d'outils spécialisés, telles les méthodes d'évalua-

tion d'impact, devient donc une nécessité absolue à ce stade-ci. Bien que les promoteurs aient le choix entre une multitude de méthodes d'évaluation des impacts environnementaux, ils s'aperçoivent qu'à l'usage, celles-ci sont souvent mal adaptées au type de projet auquel ils travaillent. Force est de constater que la recherche est encore jeune en matière d'évaluation d'impact.

1.1 Les méthodes d'évaluation d'impact

La majorité des méthodes actuelles d'évaluation d'impact ont été développées dans des domaines tels l'aménagement du territoire, l'implantation et la gestion de projets industriels, etc... Elles peuvent être regroupées selon les différents types suivants: les listes de contrôle, les méthodes matricielles, les méthodes cartographiques, les réseaux, les méthodes statistiques, les scénarios et les représentations contextuelles, la méthode delphi et diverses autres méthodes de créativité. Bien que différentes, ces méthodes ont toutes un point commun: elles visent à établir, de façon analytique, des interrelations entre l'action à entreprendre et les réactions du milieu récepteur (Couillard et Mascolo, 1979). Les lignes qui suivent donne un aperçu des quatre principales classes de méthodes citées précédemment: les listes de contrôle, les méthodes matricielles, les méthodes cartographiques et les réseaux (Couillard et Mascolo, 1983).

1.1.1 Liste de contrôle

Tel que décrit par Warner et Preston (1974), ce type de méthode consiste en l'élaboration d'une liste spécifique de paramètres environnemen-

taux, lesquels peuvent être étudiés en vue d'identifier les impacts possibles d'un projet. Selon les mêmes auteurs, les méthodes appartenant à ce groupe ne requièrent pas l'établissement des liens "cause-effet" entre les diverses activités du projet et leurs impacts.

En rapport avec le caractère normatif de ces méthodes, il est possible de pondérer les paramètres impliqués. Ces derniers peuvent être soit à caractère écologique, économique ou social (Trudel, 1977). Le tableau 1.1 fournit la liste des principales méthodes de cette catégorie, ainsi que leur domaine d'application.

1.1.2 Matrice

Les méthodes matricielles consistent essentiellement à représenter dans un tableau les relations "cause-effet" pouvant exister entre les aspects majeurs de l'action proposée (axe "X") et les éléments environnementaux susceptibles d'être touchés (axe "Y") (Therrien-Bollulo, 1976; Warner et Preston, 1974). Ce type de méthode permet de résoudre deux problèmes importants associés au processus d'évaluation d'impact soient, la réalisation du procédé compliqué d'analyse d'impact lui-même et la présentation des résultats de cette analyse de façon claire et systématique. En ce sens, l'approche matricielle permet de simplifier le traitement de problèmes complexes (Schlesinger et Daetz, 1973). En revanche, le côté bidimensionnel des matrices constitue jusqu'à un certain point une limite d'applicabilité (Trudel, 1977). Le tableau 1.2 présente quelques-unes des principales méthodes matricielles.

Tableau 1.1: Méthodes appartenant à la catégorie "Liste de contrôle"

IDENTIFICATION DE LA MÉTHODE	DOMAINE D'APPLICATION
Atkins <u>et al.</u> (1971)	Projets de routes et d'autoroutes
Institute of ecology, University of Georgia (1971)	Projets d'autoroutes
Arthur D. Little Inc. (1971)	Projets d'autoroutes
Smith, W.L. (non datée)	Projets d'autoroutes
Dee, N. (1972)	Aménagements majeurs de la ressource-eau, et autres projets
Multiagency Task Force (1972)	Projets en zone agricole
Tulsa District, U.S. Army Corps of Engineers (1972)	Projets de réservoirs et autres

Tableau 1.2: Méthodes appartenant à la catégorie "Matrice"

IDENTIFICATION DE LA MÉTHODE	DOMAINE D'APPLICATION
Leopold, L.B. (1971)	Tout type d'aménagement
Central New York Regional Planning and development Board (1972)	Projets dans le domaine de la ressource-eau
Batelle System (1972) (Therrien- Bollulo, D., non daté)	Méthode spécifique pour l'évalua- tion d'impact
Optimum pathway matrix (Odum, E.P., 1971)	Corridors de routes, localisation de centrales nucléaires, aéroports, parcs industriels
Holmes (1971) (Therrien-Bollulo, D., non-daté)	Choix d'alternatives pour un projet donné

1.1.3 Méthodes cartographiques

Comme son nom l'indique, ce type de méthodes vise à représenter cartographiquement les caractéristiques environnementales (physique, social, écologique, esthétique) du milieu touché par le projet de même que les impacts lui étant associés (Warner et Preston, 1974). Ces méthodes présentent toutefois certains désavantages: elles sont inaptes à quantifier et à identifier explicitement les répercussions d'un projet; elles nécessitent, de la part de l'analyste, un entraînement particulier (Trudel, 1977); finalement, tel qu'indiqué au tableau 1.3, elles ont un domaine d'application limité.

1.1.4 Réseau

L'idée de base de ce type de méthodes est l'établissement d'un enchaînement "cause-condition-effet" pour chacune des activités du projet susceptibles d'avoir des répercussions sur l'environnement (Warner et Preston, 1974; Sasseville et al., 1977). Tel que précisé par Trudel (1977), ces méthodes permettent d'identifier les chemins par lesquels se produisent les répercussions. Elles ont cependant le désavantage d'être faiblement reproductibles. Le tableau 1.4 indique les principales méthodes de cette catégorie.

Tableau 1.3: Méthodes appartenant à la catégorie "Méthodes cartographiques"

IDENTIFICATION DE LA MÉTHODE	DOMAINE D'APPLICATION
McHarg, I. (Desing with nature) (1969)	Projets d'autoroutes
Commonweath Ass. Inc. (Therrien-Bollulo, D., non daté)	Autoroutes, lignes à haute tension, pipelines
Krauskopf, T.M. and D.C. Bunde (1972)	Autoroutes, et sous certaines conditions les projets reliés à la ressource-eau

Tableau 1.4: Méthodes appartenant à la catégorie "Réseau"

IDENTIFICATION DE LA MÉTHODE	DOMAINE D'APPLICATION
Moore J.L. (1973)	<ul style="list-style-type: none">.Activités manufacturières dans une zone littorale.Possibilité d'application à d'autres types d'activités
Sorensen J. (1973)	<ul style="list-style-type: none">.Projets en zone littorale.Possibilité d'application à d'autres types d'activités

CHAPITRE 2

LE GRAPHE DE COHÉRENCE

CHAPITRE 2

LE GRAPHE DE COHÉRENCE

2.1 Nécessité d'une méthode "universelle"

Tel que spécifié précédemment, la majorité des méthodes d'évaluation d'impact sont issues de domaines d'activités variés. La plupart d'entre elles ont été développées et appliquées pour l'évaluation d'impact d'un type de projet en particulier. Cette spécificité génère toutefois un problème important, soit le caractère limitatif des outils d'évaluation d'impact actuellement disponibles. On a qu'à penser à la limite spatiale des matrices bi-dimensionnelles, ou encore à la non-applicabilité des méthodes statistiques en matière d'évaluation d'impact social (Trudel, 1977).

Suite à cela, une seule conclusion s'impose: la nécessité de mettre au point une méthode d'évaluation d'impact la plus universelle possible. Les principales qualités que devrait avoir une telle méthode se résument ainsi: au départ, elle devrait être suffisamment souple pour pouvoir s'adapter à tous les genres de systèmes (humain, naturel, social); en plus d'être simple, elle devrait offrir la possibilité de pondérer les interactions sans pour autant être trop normative; elle devrait également faciliter la transmission de l'information aux profanes et aux décideurs; finalement, il faudrait que dans la démarche évaluative, l'intuition ait sa place au même titre que la logique. Ce sont ces caractéristiques qui ont guidé l'élabora

tion d'une nouvelle méthode appelée "le graphe de cohérence" (Couillard et Mascolo, 1979).

2.2 Règles actuelles et problème d'application

Telle que développée actuellement, la méthode du graphe de cohérence est plus un "outil descriptif d'impact" qu'une méthode d'évaluation d'impact. Elle rend plus évidentes les interrelations entre les composantes et les résultats de l'action posée (Bourret et Thibault, 1978). En ce sens, cette méthode ne doit pas être considérée comme un outil de décision, mais plutôt comme un outil d'information qui facilite la prise de décision.

Dans le cadre de son utilisation lors de la réalisation d'études d'impact, deux rôles précis sont associés au graphe de cohérence. En premier lieu, le graphe oriente la réflexion lors de l'identification des relations "homme-environnement". Contrairement à l'approche matricielle basée sur la relation "cause-effet", le graphe de cohérence axe le processus de réflexion sur la relation "cause-condition-effet". Cette dernière approche a l'avantage de favoriser une meilleure compréhension des phénomènes étudiés.

En second lieu, le graphe facilite la transmission de l'information issue de ce processus de réflexion, en présentant la dite information sous forme schématique. Cette forme de présentation permet de percevoir, sur simple consultation, les principaux aspects du problème étudié.

Les règles qui régissent la méthode du graphe de cohérence ont été élaborées par Couillard et Lépine (Lépine, 1975). Elles peuvent être résumées ainsi: la méthode du graphe de cohérence consiste à reporter sur un graphe à plusieurs niveaux les causes, les conditions et les effets d'une action donnée; cette action est décomposée du niveau M "résultantes de l'action" vers le niveau N "composantes de l'action" ou vice-versa à travers un certain nombre de niveaux intermédiaires. Le nombre de niveaux est fonction du problème posé; il existe une relation univoque entre un élément i d'un niveau M qui contribue à un changement d'un élément j d'un autre niveau N. Ainsi, chacun des éléments des différents niveaux est relié par des arcs à un ou plusieurs éléments des niveaux supérieurs ou inférieurs; les éléments d'un même niveau doivent être cohérents c'est-à-dire qu'ils doivent répondre à une même définition et à un même degré de généralité. Ils doivent également être indépendants l'un de l'autre (Couillard, 1981a).

À l'application, le respect de ces règles présentent toutefois un problème important. Lorsque le degré de précision du graphe tend à être général, les règles d'indépendance et de cohérence simultanées des éléments d'un même niveau s'appliquent relativement bien. Cependant, dans le cas où le degré de précision tend vers le détail, l'application de ces mêmes règles devient difficile. La tendance est alors de regrouper des éléments, ce qui implique une généralisation lente du graphe. Ce dernier point est très contraignant puisque la quantité d'information transmise par le graphe est, dans une certaine mesure, liée à son degré de précision.

Dans le cadre de ce travail, plusieurs tentatives ont été faites dans le but de solutionner ce problème. De cette recherche découle une proposition de solution qui consiste essentiellement à apporter certaines améliorations d'ordre structurelle au graphe de cohérence.

2.3 Modifications proposées et nouvelles règles

De manière à incorporer à la méthode les éléments de solution proposés, il a été nécessaire de remanier les règles du graphe de cohérence. En plus d'expliquer les modifications proposées, les deux prochaines sections décrivent les nouvelles règles de réalisation.

2.3.1 Éléments structuraux du graphe

Alors qu'originellement les "cases" et les "niveaux" étaient les seules composantes du graphe de cohérence, la solution proposée fait intervenir un nouvel élément structurel appelé "le bloc". La figure 2.1 situe ce nouvel élément parmi les autres composantes du graphe de cohérence.

notion de bloc

Un bloc est en fait un regroupement d'éléments (cases) cohérents, c'est-à-dire ayant la même définition et le même degré de généralité. Tel que représenté à la figure 2.2, on identifie trois types de blocs: le bloc inférieur associé aux facteurs causaux (action), le(s) bloc(s) intermédiaire(s) associé(s) aux conditions intermédiaires et le bloc supérieur associé aux

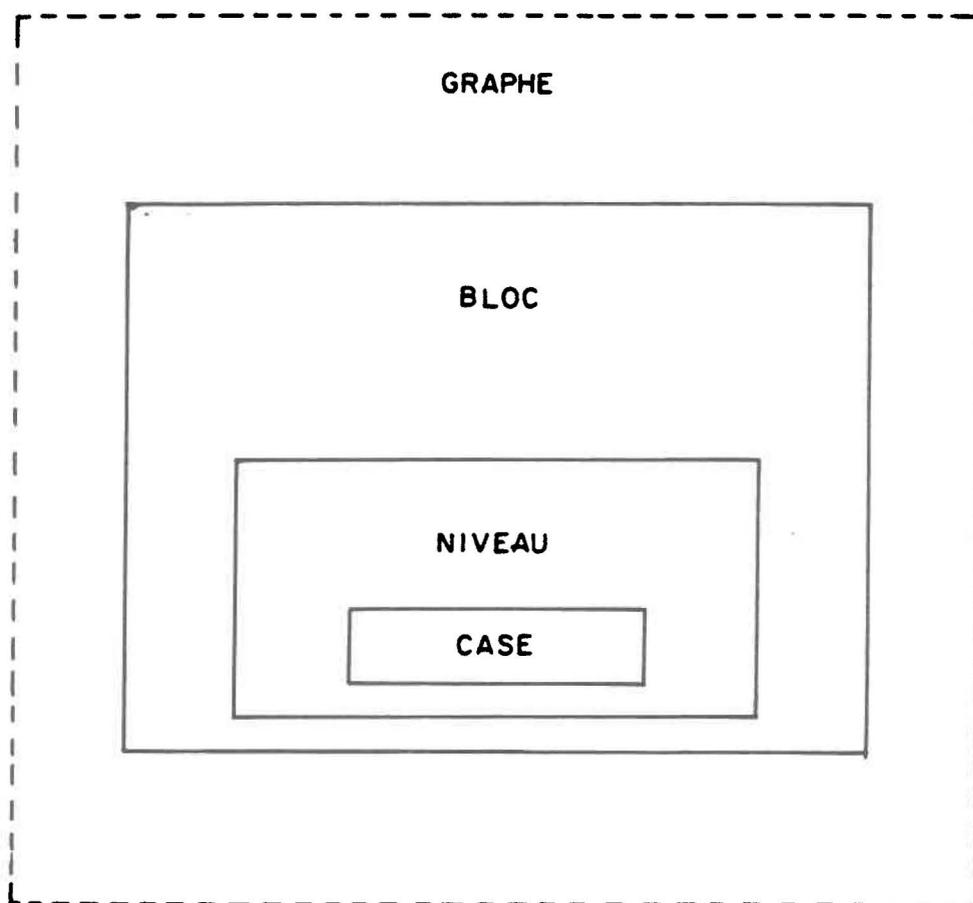


Figure 2.1: Les éléments structuraux du graphe de cohérence après modifications

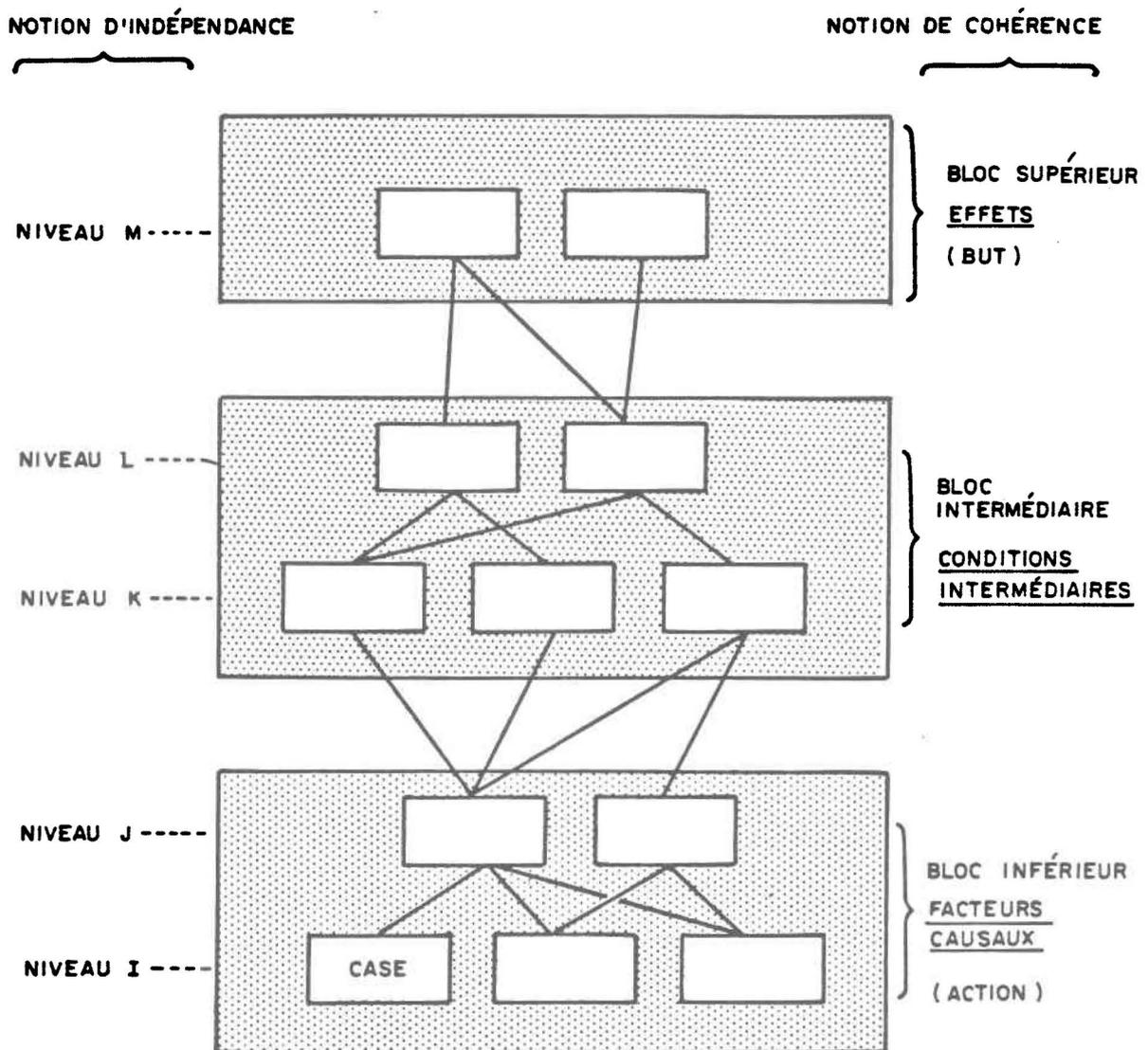


Figure 2.2: Structure du graphe de cohérence après modifications

effets. Cette notion de bloc, tout en facilitant l'interprétation du graphe lors de la phase "consultation", permet l'établissement d'interrelations entre des éléments cohérents (chose qui était très difficile avec l'ancienne approche).

notion de niveau

Dans cette nouvelle approche, le niveau est une structure qui vise à positionner les cases de façon à ce que, par un cheminement précis, la séquence des événements progresse du bas (de l'action) vers le haut (les effets).

Les éléments (cases) d'un niveau donné doivent être indépendants entre eux. Cette règle est nécessaire lorsque vient le temps de faire de l'évaluation d'impact (c'est-à-dire "pondérer les différentes interrelations du graphe").

notion de case

La case est l'unité fondamentale d'information du graphe de cohérence. Par son degré de généralité, elle permet de déterminer le niveau de résolution du graphe (il est préférable que le degré de généralité des cases d'un graphe soit le même). Le choix de chaque case se fait de manière intuitive, de préférence par un groupe multidisciplinaire qui connaît relativement bien le problème traité.

2.3.2 Interrelations

L'établissement d'un lien entre deux cases se fait suivant la relation "cause-condition-effet". Le lien représente la ou les "conditions" qui font qu'une relation peut exister entre les deux cases. La case du niveau inférieur devient alors la "cause" et la case du niveau supérieur "l'effet" (figure 2.3). Ce lien est univoque (du bas vers le haut, de la cause vers l'effet). Bien que de façon rigoureuse on doive indiquer le sens des liens par une flèche (\rightarrow), il a été convenu, afin de simplifier l'aspect visuel du graphe, de représenter les liens par un trait (-).

La même relation (cause-condition-effet) existe au niveau des blocs. Le bloc inférieur est identifié à la cause, le(s) bloc(s) intermédiaire(s) aux conditions et le bloc supérieur aux effets.

L'agencement des cases à l'intérieur du graphe se fait de manière à ce que par un cheminement précis (du bas vers le haut) on rencontre successivement les facteurs causaux, les conditions intermédiaires et les effets. Ainsi, pour qu'une case se trouve sur un niveau J d'un bloc donné, elle doit avoir un lien direct avec le niveau inférieur adjacent I. S'il existe une relation d'une case A vers une case B d'un même niveau, cette dernière (case B) passe automatiquement au niveau supérieur adjacent (indépendance des cases d'un même niveau).

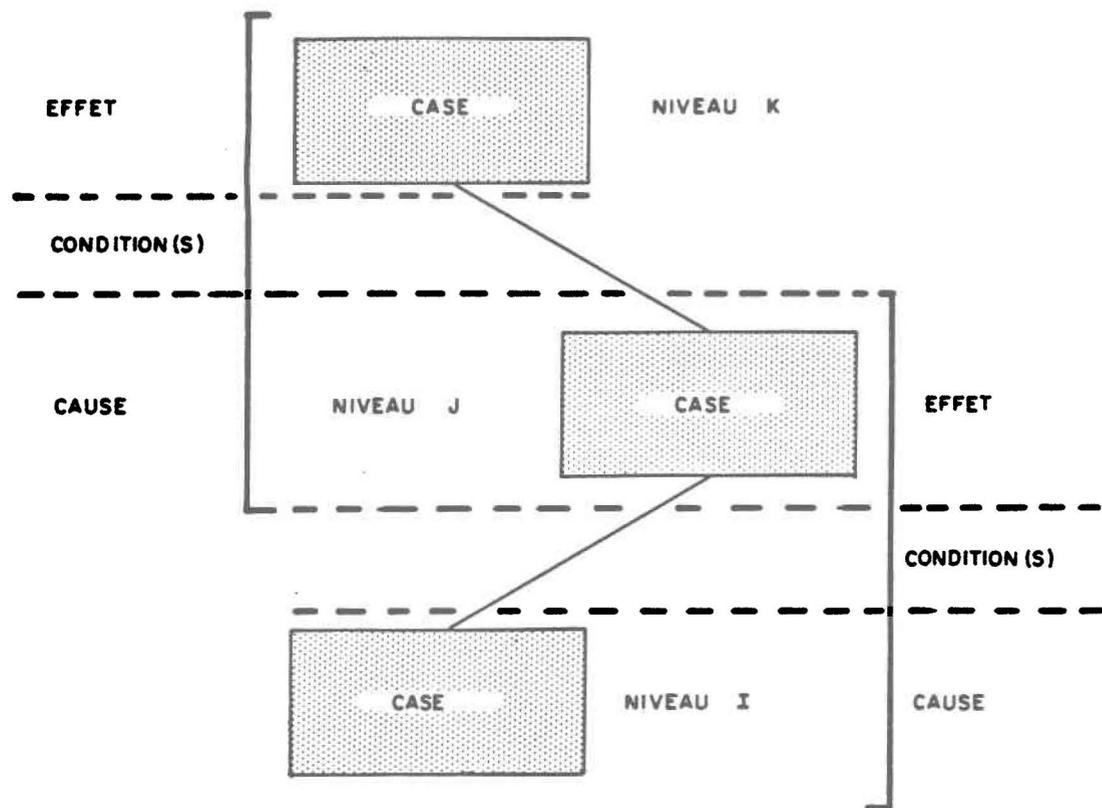


Figure 2.3: Illustration de la relation "cause-condition-effet" entre les différentes cases du graphe

CHAPITRE 3

DÉFINITION MATHÉMATIQUE ET
TECHNIQUES D'INTERPRÉTATION DU GRAPHE DE COHÉRENCE

CHAPITRE 3

DÉFINITION MATHÉMATIQUE ET
TECHNIQUES D'INTERPRÉTATION DU GRAPHE DE COHÉRENCE

Face à un besoin pour la représentation d'impacts, le graphe de cohérence a été proposé (Couillard, 1981). Sa définition a été faite afin de se modeler à cette utilisation. Mais ses lois et ses caractéristiques ont été, jusqu'ici, présentées de façon plutôt intuitive. L'étape logique suivante serait d'en arriver à une définition plus rigoureuse qui est la représentation mathématique du graphe de cohérence. En plus d'ajouter un encadrement plus rigide, une définition mathématique du graphe de cohérence facilite son interprétation.

Le présent chapitre va donc, dans une première partie, faire la description graphique du graphe de cohérence. Ainsi, à l'aide du langage mathématique retrouvé dans la théorie des graphes, une définition de ce type de graphe sera faite. Dans une deuxième partie, certaines techniques mathématiques seront appliquées au graphe de cohérence afin d'en tirer une interprétation plus précise et plus complète. La base principale de ces techniques est la matrice. À cette fin, 2 types de matrices seront utilisés, soient la matrice booléenne et la matrice d'incidence, chacune permettant l'acquisition d'informations particulières.

Il est à remarquer que ce chapitre se veut accessible à tous. Ainsi, certains détails et la rigueur retrouvées dans les manuels de mathématiques seront réduits pour ne laisser place qu'à l'essentiel. Les définitions et explications supplémentaires ainsi que les démonstrations de théorèmes et de certains énoncés seront retrouvées dans les références citées. De plus, pour ne pas avoir à donner la signification des symboles mathématiques utilisés à l'intérieur de ce chapitre, une liste avec leur définition a été dressée et placée au début de la thèse.

3.1 Description graphique du graphe de cohérence

3.1.1 Graphes

D'un point de vue intuitif, un graphe peut être défini comme un ensemble fini de 2 ou plus de points différents, dont certaines paires sont jointes par une ou plusieurs lignes (Giblin, 1977). La forme résultante est appelé un "graphe" et peut être notée par G . La ligne joignant 2 points différents est appelé "arc" ou "arête" du graphe. Les points du graphe sont appelés "sommets".

Habituellement, les sommets d'un graphe sont considérés être des points dans l'espace Euclidien¹ et les arcs ou arêtes sont des lignes droites ou courbes joignant ces points. Cependant, de par sa nature de schéma, un graphe n'a aucune signification géométrique. Ainsi, l'espace qui le

¹ Espace Euclidien: Un espace Euclidien à n -dimensions noté par E est défini comme l'ensemble de tous les vecteurs. Pour ces vecteurs, l'addition et la multiplication par un scalaire sont définies par les règles pour les opérations matricielles. De plus, dans cet espace, existe la notion de distance entre 2 vecteurs quelconques de l'ensemble (Hadley, 1962).

contient ne sert qu'à le situer et la notion de distance entre 2 sommets ne peut être considérée.

De façon plus rigoureuse, un graphe G peut être défini comme étant tout schéma dans \mathbb{R}^n (où $n=2$, le plus souvent) constitué:

- 1) d'un ensemble X de points dans \mathbb{R}^n , appelés sommets du graphe G
et
- 2) d'un ensemble U de lignes, chacune reliant 2 sommets quelconques de G .

La paire de sommets (x_i, x_j) où $x_i \in X, x_j \in X (i \neq j)$, définit entièrement chacune des lignes dans U . Ainsi, si la paire de sommets est pourvue d'un ordre, la ligne reliant ces 2 sommets s'appelle "arc" et le sens de l'orientation est indiqué par une flèche. Tandis que pour une paire de sommets où l'ordre n'est pas considéré, la ligne faisant le lien ne porte aucune orientation et s'appelle "arête". Une arête correspond à 2 arcs d'orientation opposée reliant les 2 mêmes sommets. Les points x_i et x_j formant la paire sont dits "jointifs".

Le graphe ainsi défini se note $G=(X,U)$ et $(x_i, x_j)=u_k$ où $x_i, x_j \in X$ et $u_k \in U$. De plus, un graphe $G=(X,U)$ peut être traité comme une représentation graphique d'une relation binaire R^1 de X à X , où U est l'ensemble des couples de $X \times X$ tel que la relation R soit vérifiée. Le lien est représenté par une ligne.

¹ Relation binaire: soient d'une part 2 ensembles E_1 et E_2 et d'autre part, la relation R définissant un lien des éléments de E_1 aux éléments de E_2 . L'ensemble U des couples d'éléments (e_1, e_2) est un sous-ensemble de $E_1 \times E_2$. Une telle relation R est dite relation binaire de E_1 à E_2 (Roy, 1969).

Alors, le graphe de cohérence pour qu'il puisse porter le nom de graphe doit, à priori, suivre la définition générale d'un graphe. Les sommets sont représentés par les composantes d'une action et par les résultantes de cette action. Les lignes joignant les sommets démontrent les relations entre les points.

3.1.2 Graphe orienté et p-graphe

Si un graphe est formé exclusivement d'arcs, c'est-à-dire, si une orientation est donnée pour chaque ligne du graphe, celui-ci est dit "orienté" (voir figure 3.1). De plus, on appelle un p-graphe, un graphe orienté où on rencontre au plus p arcs allant d'un point à un autre. Ainsi, dans un p-graphe $G=(X,U)$, l'arc (x,y) tel que $x, y \in X$ et $(x,y) \in U$, ne peut apparaître plus de p fois (voir figures 3.2a et 3.2b).

Suite à ces définitions, le graphe de cohérence se doit d'être un graphe orienté. En effet, la notion d'interrelation entre les composantes d'une action et les résultantes de cette action, définissant le graphe de cohérence, n'a pas de signification si une direction n'est pas assignée à ces interrelations. De plus, le graphe de cohérence est un 1-graphe, ne permettant qu'une seule relation entre 2 éléments.

3.1.3 Réflexivité et antisymétrie

Un graphe $G=(X,U)$ est réflexif, si et seulement si l'arc $(x,x) \in U$ et ce, pour tout $x \in X$. En d'autres termes, un graphe est réflexif si, pour

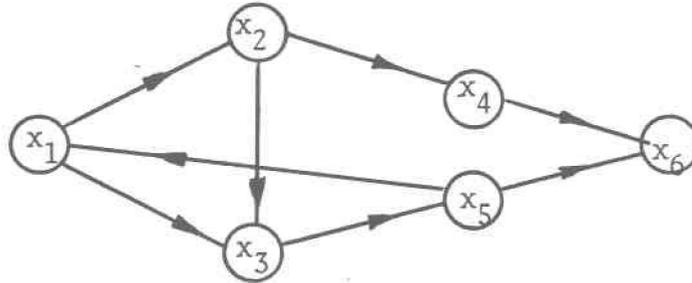


Figure 3.1: Graphe orienté

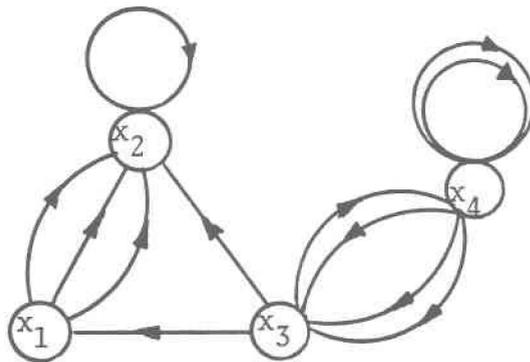


Figure 3.2a: 3-graphe

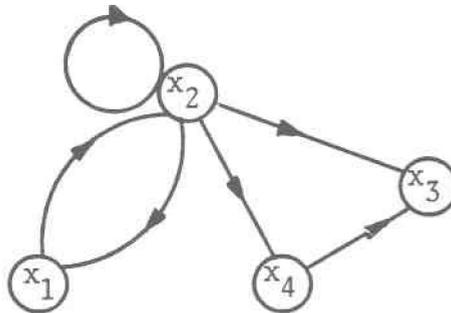


Figure 3.2b): 1-graphe

chaque sommet de X , il existe une boucle (voir figure 3.3). L'antisymétrie d'un graphe est définie comme suit: soit le graphe $G=(X,U)$, si pour $x \neq y$, x et $y \in X$, la paire de sommets $(x,y) \in U \rightarrow (y,x) \notin U$. Ainsi G est antisymétrique si toute paire de sommets adjacents ($x \neq y$) est reliée dans une seule direction (voir figure 3.4).

On sait que pour le graphe de cohérence, la relation qui existe entre 2 éléments est de type progressif, c'est-à-dire qu'elle n'existe que d'un niveau inférieur à un niveau supérieur. On a donc une seule et même direction pour chaque arc et elle est "montante". De plus, il est défini qu'à l'intérieur d'un tel type de graphe, aucun lien sur un même niveau n'est permis. Ainsi toutes les boucles sont automatiquement proscrites. Le graphe de cohérence peut donc être qualifié d'antisymétrique et de non réflexif.

3.1.4 Chemin et circuit; chaîne et cycle

Un chemin μ dans le graphe $G=(X,U)$ se définit comme étant une suite non vide d'arcs $u_i \in U$, tel que l'extrémité terminale de chaque arc corresponde à l'extrémité initiale de l'arc suivant (Roy, 1969). On l'écrit ainsi:

$$\mu = (x_{i_1}, x_{i_2}), \dots, (x_{i_p}, x_{i_{p+1}}), \dots, (x_{i_{q-1}}, x_{i_q})$$

où

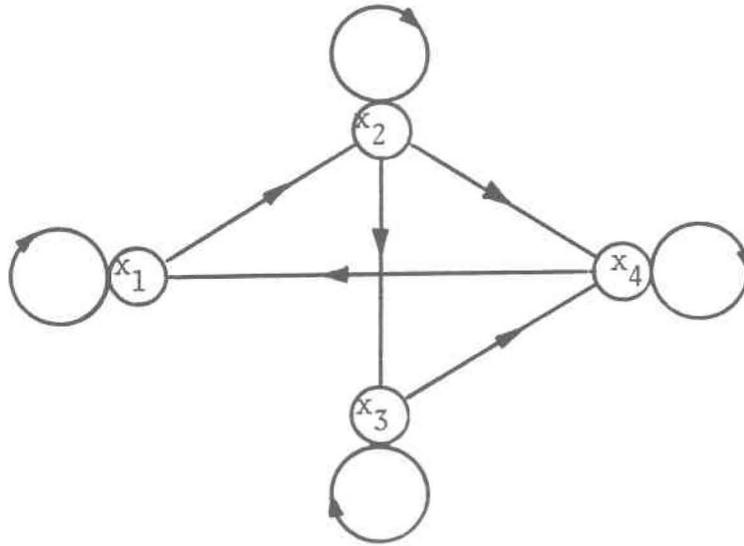


Figure 3.3: Graphe réflexif

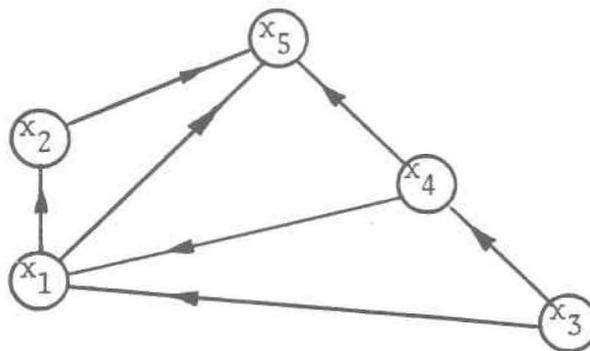


Figure 3.4: Graphe antisymétrique

$$x_{i_p} \in X \text{ et } (x_{i_p}, x_{i_{p+1}}) \in U \text{ pour } p=1,2, \dots, (q-1)$$

Plus spécifiquement, un chemin est dit "élémentaire" s'il ne passe pas plus d'une fois par chacun de ses points, c'est-à-dire s'il n'utilise pas 2 fois le même sommet (Barbeau, 1978). La suite de sommets définissant un tel chemin est donc sans répétition. De plus, s'il ne passe pas plus d'une fois par chacun de ses arcs, on parle de chemin "simple". La suite d'arcs qui le définit est donc sans répétition. Il est évident que tout chemin élémentaire est simple, mais la réciproque n'est pas nécessairement vraie.

Un circuit¹ est un chemin particulier. En effet, un circuit σ du graphe $G=(X,U)$ est un chemin μ tel que l'extrémité terminale du dernier arc corresponde à l'extrémité initiale du premier arc. On peut dire aussi qu'un circuit σ est une suite non vide de sommets tel que:

$$\sigma = x_{i_1}, \dots, x_{i_{p-1}}, x_{i_p}, \dots, x_{i_q}, x_{i_1}$$

où

$$x_{i_p} \in X, \text{ et } (x_{i_{p-1}}, x_{i_p}) \in U, (x_{i_q}, x_{i_1}) \in U, \text{ pour } p = 1,2, \dots, (q).$$

Une chaîne μ' d'un graphe orienté $G=(X,U)$ est une suite non vide de sommets tel que 2 sommets consécutifs soient toujours adjacents (Roy, 1969). Ainsi, chaque arc de la séquence a une extrémité en commun avec

¹ Le terme anglais pour identifier un circuit est "cycle". Le terme français "cycle" est traduit en anglais par "circuit"

l'arc précédent et l'autre extrémité en commun avec l'arc suivant. Autrement dit, une chaîne est considérée comme une suite d'arêtes (lignes non orientées), c'est-à-dire qu'une chaîne ne considère pas l'orientation, contrairement au chemin. Quant aux définitions de chaînes "simple" et "élémentaire", elles sont similaires à celles données pour les chemins simple et élémentaire.

Un cycle σ' du graphe orienté $G=(X,U)$ est une suite non vide de sommets tel que 2 sommets consécutifs soient toujours adjacents et que le dernier sommet de la suite corresponde à son premier sommet. De plus, le même arc ne peut figurer 2 fois dans la séquence.

Il ressort de ces définitions, que tout chemin peut être une chaîne et que tout circuit peut être un cycle, mais l'inverse n'est pas nécessairement vrai. La figure 3.5 fait voir les différentes définitions.

Maintenant, si nous considérons le graphe de cohérence, il est clair qu'un tel graphe est sans circuits. En effet, puisque l'interrelation progresse toujours d'un niveau inférieur à un niveau supérieur, il est impossible de trouver un chemin tel que son extrémité terminale coïncide avec son extrémité initiale. Cependant, il est possible de trouver un ou plusieurs cycles dans un graphe de cohérence. La figure 3.6 le démontre bien. De plus, d'après la définition d'un graphe sans circuits, celui-ci devient nécessairement un graphe antisymétrique et sans boucles.

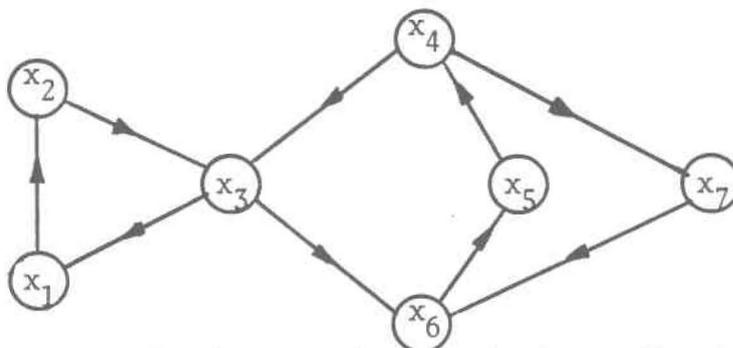


Figure 3.5: Graphe avec chaîne, chemin, cycle et circuit
 $(x_5, x_6, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7)$ est une chaîne non élémentaire et non simple, mais n'est pas un chemin;
 $(x_7, x_6, x_5, x_4, x_3, x_1, x_2, x_3)$ est un chemin non élémentaire mais simple;
 $(x_4, x_3, x_6, x_7, x_4)$ est un cycle mais n'est pas un circuit;
 $(x_5, x_4, x_7, x_6, x_5)$ est un circuit.

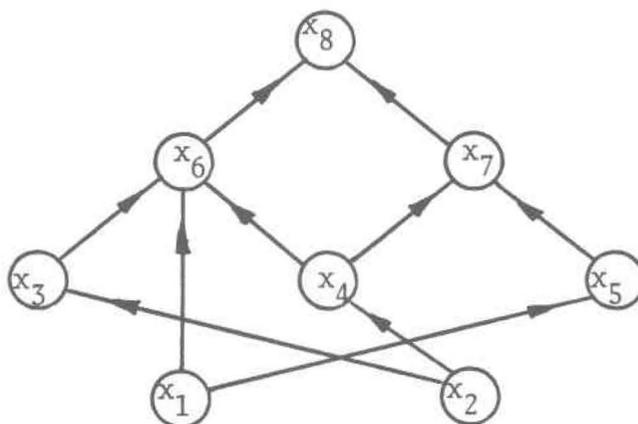


Figure 3.6: Graphe de cohérence avec cycles; $(x_1, x_6, x_8, x_7, x_5, x_1)$ et $(x_2, x_3, x_6, x_4, x_2)$ sont des cycles.

3.1.5 Degré d'un sommet et ordre d'un graphe

Soient $G=(X,U)$, un graphe orienté et x_i un sommet quelconque de G . Un arc $u_k \in U$ est "incident vers l'intérieur" de x_i , s'il a pour extrémité initiale un sommet autre que x_i et pour extrémité terminale le sommet x_i . De même, un arc $u_k \in U$ reliant le sommet x_i vers un autre sommet est dit "incident vers l'extérieur" de x_i . On nomme l'ensemble des arcs incidents vers l'intérieur de x_i , $w^-(x_i)$ et l'ensemble des arcs incidents vers l'extérieur de x_i , $w^+(x_i)$. L'ensemble des arcs incidents à x_i se note $w(x_i) = w^+(x_i) \cup w^-(x_i)$. Le nombre d'arcs incidents vers l'intérieur de x_i définit le degré intérieur de x_i et se note $d^-(x_i)$, tandis que le nombre d'arcs incidents vers l'extérieur de x_i définit le degré extérieur de x_i et se note $d^+(x_i)$ (Roy, 1969). Ainsi, on a: $d^+(x_i) = |w^+(x_i)|$ et $d^-(x_i) = |w^-(x_i)|$. Et le degré du sommet x_i , c'est-à-dire le nombre d'arcs qui partent et qui arrivent au sommet x_i est:

$$d(x_i) = d^+(x_i) + d^-(x_i) \text{ (voir figure 3.7).}$$

Quant à l'ordre d'un graphe $G=(X,U)$, on dit qu'il est défini par le nombre de sommets dans G . Ainsi, l'ordre d'un graphe de cohérence consiste en le nombre d'éléments le composant, c'est-à-dire la somme des composantes de l'action, ajoutée à celle des résultantes de l'action.

Concernant le degré des sommets du graphe de cohérence, il existe au moins 1 sommet dont le degré intérieur est nul. Ce ou ces sommets se situent au moins sur le premier niveau et leur degré extérieur se doit d'être

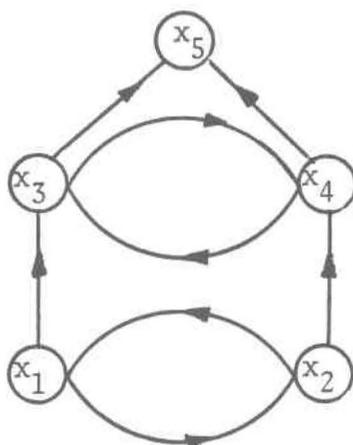


Figure 3.7:

Degré des sommets:

$$d^+(x_1) = 2; d^-(x_1) = 1; d(x_1) = 3$$

$$d^+(x_2) = 2; d^-(x_2) = 1; d(x_2) = 3$$

$$d^+(x_3) = 2; d^-(x_3) = 2; d(x_3) = 4$$

$$d^+(x_4) = 2; d^-(x_4) = 2; d(x_4) = 4$$

$$d^+(x_5) = 0; d^-(x_5) = 2; d(x_5) = 2$$

tre non nul afin de respecter la connexité du graphe (voir partie 3.1.6). De même, tous les sommets sur le dernier niveau ont leur degré intérieur différent de 0 et leur degré extérieur égal à 0 puisque les relations entre les éléments ne sont que d'un niveau inférieur à un niveau supérieur.

3.1.6 Connexité

Soient le graphe $G=(X,U)$ et la relation binaire R_s (voir définition page 22) définie sur l'ensemble des sommets X de G tel que $(x,y) \in U$ vérifie R_s s'il existe une chaîne (sans orientation) entre x et y ; alors cette relation en est une de connexité simple (Roy, 1970). Les classes de X selon la relation binaire R_s portent le nom de composantes simplement connexes (s-connexes) (voir figure 3.8).

Lorsque le graphe ne contient qu'une seule composante s-connexe, on le dit simplement connexe. En d'autres termes, un graphe est simplement connexe (certains auteurs utilisent uniquement la terminologie graphe connexe) si entre chaque paire de sommets x et y ($x \neq y$) il existe une chaîne pour les relier (Roberts, 1978).

Maintenant, soit la relation binaire R_f définie sur l'ensemble des sommets X de G tel que $(x,y) \in U$ vérifie R_f s'il existe un circuit (avec orientation) passant par x et y ; la relation ainsi définie en est une de connexité forte (Roy, 1970). Les classes de X selon la relation R_f s'appellent composantes fortement connexes (f-connexes) (voir figure 3.9).

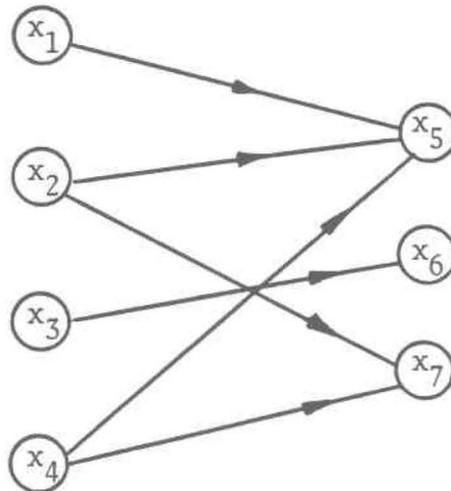


Figure 3.8: Graphe ayant 2 composantes s-connexes:
 $\{x_3, x_6\}$ et $\{x_1, x_2, x_4, x_5, x_7\}$

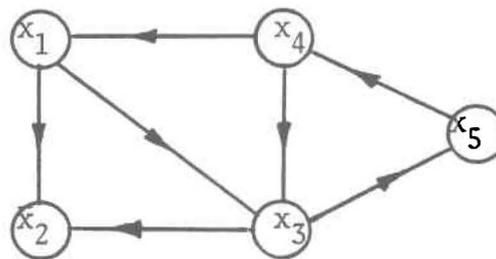


Figure 3.9: Graphe ayant 2 composantes f-connexes:
 $\{x_1, x_3, x_5, x_4\}$ et $\{x_2\}$

Lorsque X n'a qu'une seule composante f -connexe, le graphe est qualifié de fortement connexe. Ainsi, un graphe est fortement connexe si de tout sommet $x \in X$ on peut atteindre tout autre sommet $y \in X$ en suivant un chemin (avec orientation) du graphe (Roberts, 1978). Les figures 3.10a et 3.10b font voir ce que sont des graphes fortement connexe et simplement connexe.

Face à ces définitions, le graphe de cohérence ne peut être fortement connexe ne comportant aucun circuit. Cependant un graphe de cohérence se doit d'être connexe (simplement connexe). Si tel n'est pas le cas, chaque composante simplement-connexe constitue en elle-même un graphe de cohérence (voir figure 3.11).

3.1.7 Hiérarchie

Un graphe hiérarchisé, ou tout simplement une hiérarchie, est un graphe dans lequel chaque composante fortement-connexe est constitué d'un seul élément. Ainsi, un graphe est hiérarchisé si et seulement si il est orienté et sans circuits (Kuntzmann, 1972). Ceci entraîne le fait que 2 sommets adjacents ne peuvent être reliés par 2 arcs de sens opposé. De là découle automatiquement les caractéristiques voulant qu'un tel graphe soit antisymétrique et sans circuits (voir figure 3.12).

La forme générale d'un graphe de cohérence permet, intuitivement, de l'associer à une hiérarchie. De plus, le graphe de cohérence ne compor-

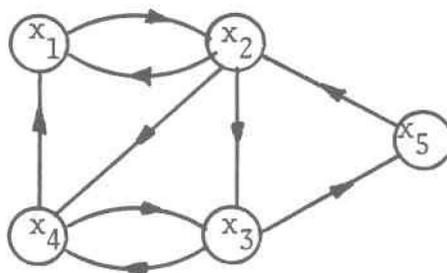


Figure 3.10a: Graphe fortement connexe

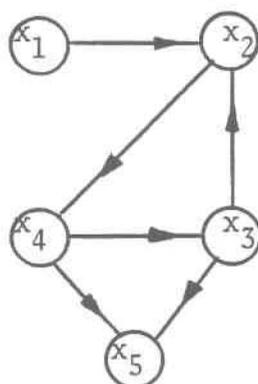


Figure 3.10b: Graphe simplement connexe mais non fortement connexe

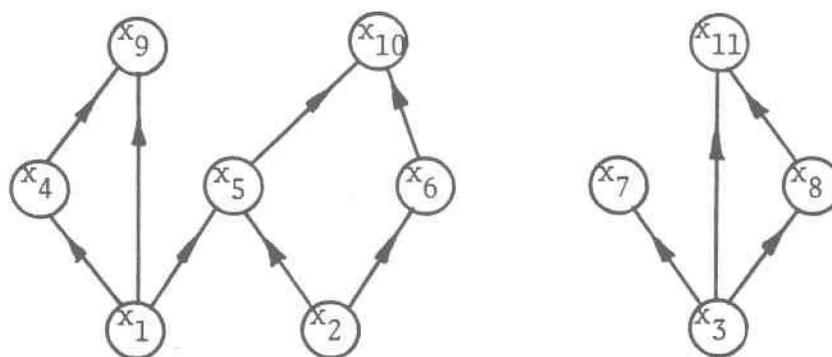


Figure 3.11: 2 graphes de cohérence pour un seul projet; chaque graphe est connexe.

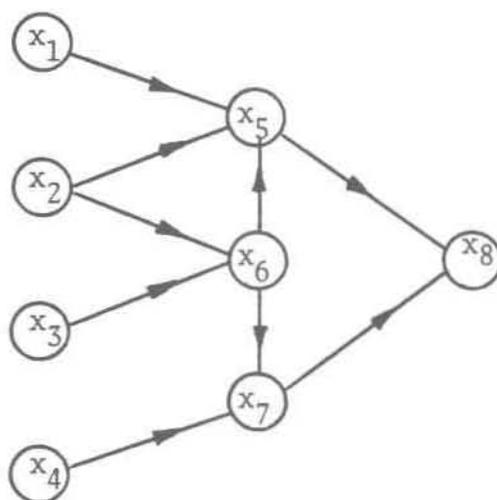


Figure 3.12: Hiérarchie

tant aucun circuit, il est impossible de trouver une relation de connexité forte entre 2 sommets d'un tel type de graphe. Ceci permet de dire que chaque composante fortement connexe du graphe de cohérence ne contient qu'un seul élément définissant ainsi un graphe hiérarchisé. D'ailleurs on retrouve les caractéristiques d'une hiérarchie dans un graphe de cohérence; ces caractéristiques sont un graphe orienté, sans circuits et antisymétrique.

3.1.8 Partition

Dans une hiérarchie, on peut toujours trouver une structure ordonnée. On parle alors de partition en couches ou niveaux. Soit le graphe hiérarchisé $G=(X,U)$. Les niveaux d'une hiérarchie sont des sous-ensembles Y_i de X tel que $X = \bigcup_{j=1}^q Y_j$, $Y_j \cap Y_k = \emptyset$ ($j \neq k$). De plus, tout arc $u_i \in U$ est tel que son extrémité initiale soit dans un niveau inférieur par rapport à son extrémité terminale. Ainsi, pour $u_i=(y_j, y_k)$ où $j \neq k$, $y_j \in Y_p \Rightarrow y_k \in Y_q$ pour $p < q$. Ainsi défini, les sommets sur un même niveau ne peuvent être reliés. Un graphe de cohérence est, en fin de compte, une hiérarchie où la structure ordonnée est établie. Dans un graphe de cohérence, sur les niveaux disjoints et ordonnés, se retrouvent des éléments indépendants (relativement indépendants).

3.1.9 Fonction ordinale

La fonction ordinale ne peut s'appliquer qu'au graphe sans circuits. Elle est donc applicable à une hiérarchie. Soit une hiérarchie $G=(X,U)$ avec les niveaux Y_i . La fonction ordinale d'un sommet $x \in X$ identifie le niveau le contenant. Ainsi pour $x \in Y_k$, sa fonction ordinale est k . Certains auteurs parlent de rang du sommet x au lieu de fonction ordinale. Puisque ce type de fonction peut s'appliquer à une hiérarchie, elle peut donc l'être au graphe de cohérence.

3.1.10 Tableaux associés à un graphe

Tout graphe peut être représenté par une matrice. Et on distingue, entre autre, 2 types de matrice pouvant représenter les relations binaires d'un graphe. Ces matrices sont la matrice booléenne et la matrice d'indidence, lesquelles sont définies dans les prochains paragraphes.

La matrice booléenne est un tableau carré dont les lignes et les colonnes sont les sommets du graphe (Roy, 1969). Ce type de matrice compare chaque sommet l'un par rapport à l'autre et donne comme entrée à la case (i,j) le chiffre 1 s'il existe un arc ayant pour extrémité initiale le sommet x_i et pour extrémité terminale le sommet x_j . En d'autre cas, l'entrée est 0. Ainsi, l'élément m_{ij} de la matrice booléenne M associée au graphe $G=(X,U)$ se définit comme suit (voir figure 3.13):

$$m_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } (x_i, x_j) \in U \\ 0 & \text{si } (x_i, x_j) \notin U \end{cases}$$

La matrice d'incidence est un tableau non nécessairement carré dont les lignes font référence aux sommets et les colonnes aux arcs. Soit le graphe orienté sans boucle $G=(X,U)$ et soient x_i et u_j respectivement un sommet et un arc du graphe G . L'élément a_{ij} dans la matrice d'incidence A est défini comme suit (voir figure 3.14):

$$a_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{si } x_i \text{ n'est à aucune des extrémités de } u_j \\ +1 & \text{si } x_i \text{ est l'extrémité initiale de } u_j \\ -1 & \text{si } x_i \text{ est l'extrémité terminale de } u_j. \end{cases}$$

Comme il a été mentionné au début de cette section, à tout graphe on peut lui associer une matrice. Il va donc de soi que tout graphe de cohérence peut être représenté par une matrice dont le type peut être un des deux définis dans les lignes précédentes. Les propriétés des matrices booléennes et d'incidence associées au graphe de cohérence sont discutées dans les prochains paragraphes.

3.2 Interprétation du graphe de cohérence à l'aide des matrices

3.2.1 Matrice booléenne

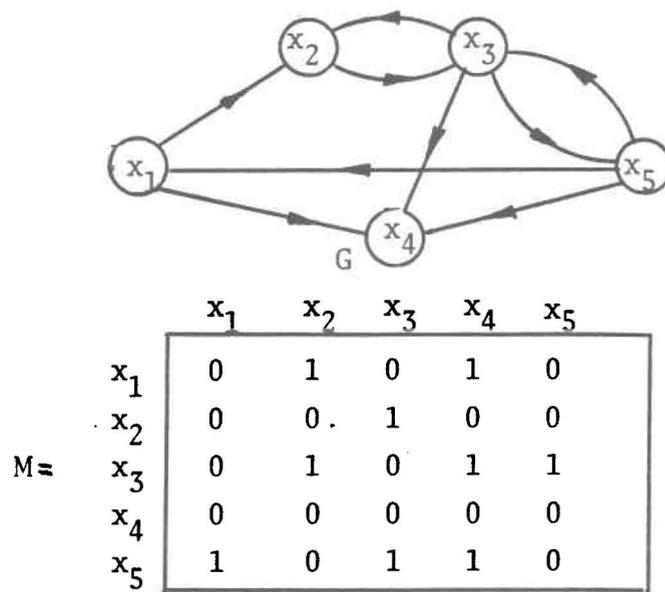


Figure 3.13: Matrice booléenne représentant le graphe G

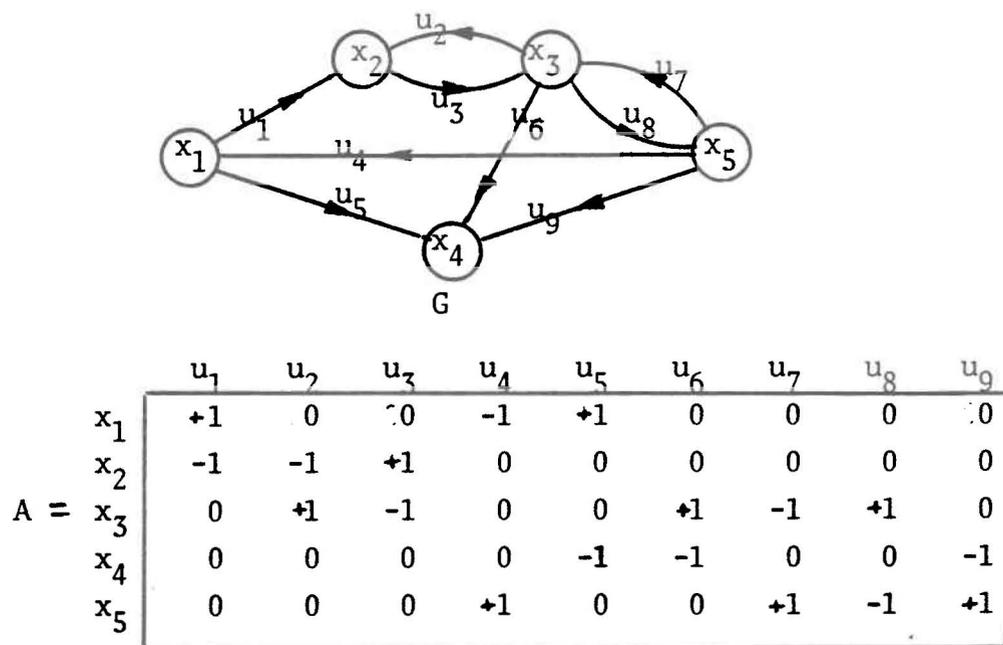


Figure 3.14: Matrice d'incidence représentant le graphe G

3.2.1.1 Définition

Comme mentionné dans la partie précédente, tout graphe peut être représenté par une matrice. Et ce type de matrice peut être en particulier une matrice booléenne.

La matrice booléenne associée au graphe $G=(X,U)$ est définie comme étant un tableau carré dont les lignes et les colonnes sont les sommets du graphe. Une telle matrice compare chaque sommet l'un par rapport à l'autre. Elle donne comme entrée à la case (i,j) le chiffre 1 s'il existe un arc ayant pour extrémité initiale le sommet $x_i \in X$ et pour extrémité terminale, le sommet $x_j \in X$. En d'autres cas, l'entrée est 0. Ainsi, l'élément m_{ij} de cette matrice suit donc la définition suivante (voir figure 3.13):

$$m_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } (x_i, x_j) \in U \\ 0 & \text{si } (x_i, x_j) \notin U \end{cases}$$

Pour le graphe de cohérence, afin de faciliter la compréhension des prochaines lignes, la matrice M associée à ce graphe sera construite d'une façon précise. Les sommets x_i de ce graphe, lequel contient m niveaux, seront notés de telle sorte que:

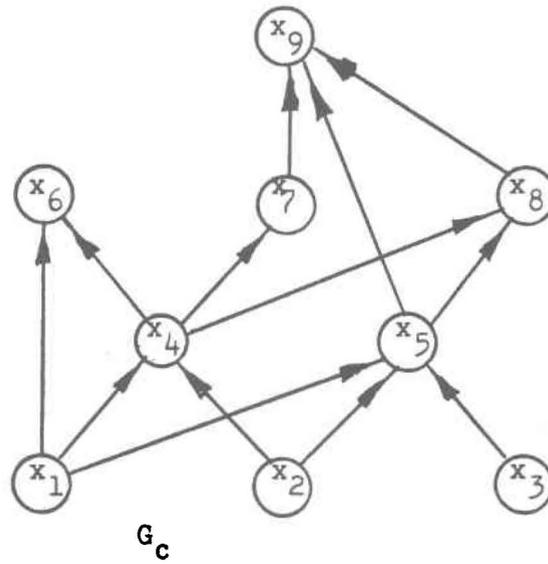
$i = 1, 2, \dots, n_1$ si x_i est sur le niveau 1 (niveau contenant les actions du projet),

Étant donné que toute relation entre les éléments du graphe n'existe que si elle est d'un niveau inférieur à un niveau supérieur, il est évident que pour x_i et $x_j \in X$, l'arc $(x_j, x_i) \notin U$ si $i < j$. Ainsi, la matrice M d'ordre $n \times n$ ($n = |X|$) associée à G_c devient triangulaire supérieure. Celle-ci est définie comme étant une matrice carrée telle que tous ses éléments au-dessous de la diagonale soient nuls. De plus, puisque dans un graphe de cohérence aucune boucle n'est permise, c'est-à-dire $(x_i, x_i) \notin U$ pour tout $x_i \in X$, les éléments de la diagonale sont donc 0. La figure 3.15 illustre ces 2 caractéristiques.

b) Partition

Soit la matrice $A = \begin{pmatrix} P & Q \\ R & S \end{pmatrix}$. Si $P_{m \times n}$, $Q_{m \times 1}$, $R_{k \times n}$ et $S_{k \times 1}$ forment la matrice A d'ordre $(m+k) \times (n+1)$, alors P , Q , R et S sont appelés des blocs de A . Et les blocs d'une matrice A sont définis comme étant des sous-matrices disjointes l'une de l'autre et dont l'union forme A . L'arrangement $\begin{pmatrix} P & Q \\ R & S \end{pmatrix}$ est appelé une partition de A (Lancaster, 1969).

Suite à ces définitions, il apparaît que la matrice booléenne M associée au graphe de cohérence $G_c = (X, U)$ peut être partitionnée en blocs, selon les niveaux composant le graphe. La représentation matricielle M de tout graphe de cohérence suit donc la forme suivante:



$M =$

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
x_1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
x_2	0	0	0	1	1	0	0	0	0
x_3	0	0	0	0	1	0	0	0	0
x_4	⋮	⋮	0	0	0	1	1	1	0
x_5	⋮	⋮	⋮	0	0	0	0	1	1
x_6	⋮	⋮	⋮	⋮	0	0	0	0	0
x_7	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	0	0	0	1
x_8	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	0	0	1
x_9	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figure 3.15: Matrice booléenne M du graphe de cohérence G_c : matrice triangulaire supérieure avec diagonale nulle.

$$M_{n \times n} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1m} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{m1} & A_{m2} & \dots & A_{mm} \end{pmatrix}$$

où A_{ij} est une sous-matrice de M comparant les éléments du niveau i à ceux du niveau j .

L'ordre de A_{ij} est $(k_i \times L_j)$ où k_i = nombre d'éléments sur le niveau i ,

$$i=1,2, \dots, m$$

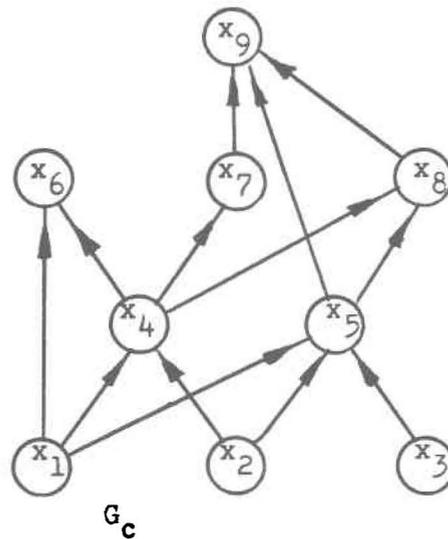
L_j = nombre d'éléments sur le niveau j ,

$$j=1,2, \dots, m$$

et l'ordre de M est $(n \times n)$ où $n = \sum_{i=1}^m k_i = \sum_{j=1}^m l_j$ = le nombre de sommets

dans G_c .

L'examen des blocs sur la diagonale A_{ii} , $i=1,2, \dots, m$, montre que ceux-ci ne peuvent être composés que de 0. En effet, puisque la sous-matrice A_{ii} compare les éléments du graphe situés sur le même niveau et qu'il doit y avoir indépendance sur un même niveau, tout bloc A_{ii} , $i=1,2, \dots, m$, où m est le nombre de niveaux, ne peut contenir que des 0. De plus, les blocs A_{ij} tel que $j < i$ sont, eux aussi, des sous-matrices nulles, celles-ci contenant les éléments d'une matrice triangulaire supérieure. La figure 3.16 montre la partition d'un graphe de cohérence.



G_c

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
x_1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
x_2	0	0	0	1	1	0	0	0	0
x_3	0	0	0	0	1	0	0	0	0
x_4	0	0	0	0	0	1	1	1	0
x_5	0	0	0	0	0	0	0	1	1
x_6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x_7	0	0	0	0	0	0	0	0	1
x_8	0	0	0	0	0	0	0	0	1
x_9	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$$M_{9 \times 9} = \begin{pmatrix} (A_{11})_{3 \times 3} & (A_{12})_{3 \times 2} & (A_{13})_{3 \times 3} & (A_{14})_{3 \times 1} \\ (A_{21})_{2 \times 3} & (A_{22})_{2 \times 2} & (A_{23})_{2 \times 3} & (A_{24})_{2 \times 1} \\ (A_{31})_{3 \times 3} & (A_{32})_{3 \times 2} & (A_{33})_{3 \times 3} & (A_{34})_{3 \times 1} \\ (A_{41})_{1 \times 3} & (A_{42})_{1 \times 2} & (A_{43})_{1 \times 3} & (A_{44})_{1 \times 1} \end{pmatrix}$$

Figure 3.16: Partition de la matrice booléenne M associée au graphe de cohérence G_c .

3.2.1.3 Propriétés

a) Matrice singulière

Une des propriétés de la matrice triangulaire est que son déterminant correspond au produit des éléments de sa diagonale. Puisque la matrice M associée au graphe de cohérence est triangulaire supérieure et est telle que les éléments de sa diagonale sont 0, son déterminant est automatiquement nul. Une telle matrice est qualifiée de singulière (Aitken, 1965).

b) Matrice non inversible

Étant donné que $M_{n \times n}$, la représentation matricielle du graphe de cohérence G_c , a un déterminant nul, il s'ensuit qu'elle est non inversible (Albiges et al., 1969). En effet, l'inverse de M, soit M^{-1} , est calculé par la formule suivante:

$$M^{-1} = \left(\frac{(-1)^{i+j} \text{Dét}(M_{ij})^t}{\text{Dét}(M)} \right)$$

où: $i=1,2,\dots,n$

$j=1,2,\dots,n$

n =nombre de sommets dans G_c

t =transposition.

Ainsi, puisque $\text{Dét}(M)=0$, M^{-1} ne peut donc exister.

c) Lignes et colonnes linéairement dépendantes

Théorème: Soit A , une matrice d'ordre $n \times n$. Son déterminant est nul, si et seulement si les lignes (ou colonnes) de vecteurs de A constituent un ensemble linéairement dépendant¹(Stoll, 1952).

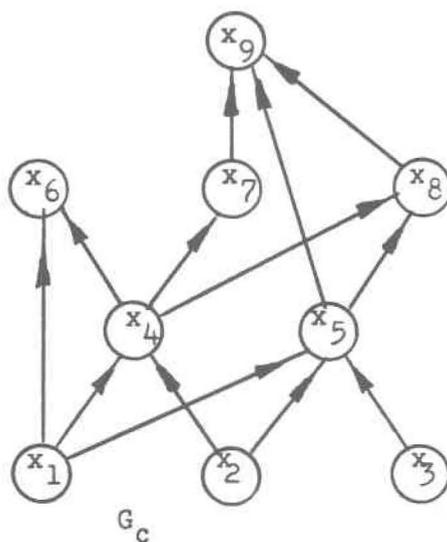
De ce théorème, il ressort que les lignes (ou colonnes) de la matrice booléenne M , associée à tout graphe de cohérence sont linéairement dépendantes, puisque son déterminant est toujours nul.

3.2.1.4 Utilisation

a) Degré intérieur et extérieur

Soit $G_c = (X, U)$, un graphe de cohérence et soit M , la matrice booléenne représentant ce graphe. En examinant cette matrice, on voit que, d'une part, la somme sur les lignes nous donne le degré extérieur (d^+) pour chaque sommet, c'est-à-dire le nombre d'arcs qui partent de chaque sommet. D'autre part, la somme sur les colonnes donne le degré intérieur (d^-) de chaque sommet, soit le nombre d'arcs qui arrivent à chaque sommet (voir figure 3.17).

¹ Dépendance linéaire: les vecteurs colonnes A_1 ($i=1,2,\dots,n$) de la matrice $A_{n \times n}$ sont linéairement dépendants s'il existe des scalaires α_i ($i=1,2,\dots,n$) non tous nuls tel que $\alpha_1 A_1 + \alpha_2 A_2 + \dots + \alpha_n A_n = 0$ (vecteur 0 d'ordre n). La même définition s'applique pour les lignes d'une matrice (Lang, 1971).



$M =$

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	d^+
x_1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	3
x_2	0	0	0	1	1	0	0	0	0	2
x_3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
x_4	0	0	0	0	0	1	1	1	0	3
x_5	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2
x_6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x_7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
x_8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
x_9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
d^-	0	0	0	2	3	2	1	2	3	

Figure 3.17: Degrés intérieurs (d^-) et extérieurs (d^+) à partir de la matrice booléenne M du graphe de cohérence G_c .

Si le graphe de cohérence devient très complexe, il devient alors plus facile de visualiser le nombre d'interactions que peut provoquer un élément, ou encore, le nombre d'éléments dont dépend un effet. Ainsi, le degré de chaque sommet donne une indication de l'étendue des effets pour chaque sommet. Cependant, sans pondération des arcs, nous ne pouvons rien dire sur l'effet global de chaque action ou résultante de l'action composant le graphe. Une action peut avoir une grande étendue pour les effets mais de valeur minime, tandis qu'une autre peut avoir une petite étendue pour les effets mais de valeur importante.

b) Ordonnement d'un graphe

Une autre utilité de la matrice booléenne est qu'elle peut servir d'outil dans la construction d'un graphe de cohérence. En effet, la mise en niveau d'un graphe peut devenir assez complexe dans certains cas. L'utilisation de la matrice booléenne selon certains algorithmes facilite cette mise en niveau. Par la suite, il suffit de vérifier la cohérence des éléments sur chaque niveau. Le tableau 3.1 propose un algorithme aidant à la construction du graphe de cohérence.

Tableau 3.1: Algorithme permettant la construction du graphe de cohérence

Soit $G=(X,U)$, un graphe dont les niveaux ne sont pas établis et soit n , le nombre de niveaux.

- 1) Formation de la matrice booléenne tel que, en abscisse, apparaisse l'ensemble des suivants et en ordonnée, le domaine des précédents,
 - où suivant de $x \in X$: tout sommet $y \in X$ tel que $(x,y) \in U$;
 - précédent de $x \in X$: tout sommet $z \in X$ tel que $(z,x) \in U$.

- 2) Formation des vecteurs contenant les sommets pour chaque niveau selon la procédure suivante:
 - i) Noter le nombre de suivants pour chaque sommet;
 - ii) Niveau n : Noter les sommets n'ayant aucun suivant; ces sommets font partie du vecteur \vec{v}_n , soit le vecteur contenant les éléments sur le $n^{\text{ème}}$ niveau;
 - iii) Déduire 1 sur les lignes dont les sommets correspondants sont reliés à des sommets du vecteur \vec{v}_n ;
 - iv) Niveau $n-1$: Parmi les sommets qui restent, noter ceux n'ayant aucun suivant; ceux-ci font partie du vecteur \vec{v}_{n-1} ;
 - v) Déduire 1 sur les lignes dont les sommets correspondants sont reliés à des sommets du vecteur \vec{v}_{n-1} ;
 - vi) Continuer iv) et v) jusqu'à ce que tous les sommets soient contenus dans un vecteur \vec{v}_i , $i=1,2,\dots,n$, où n = nombre de niveaux du graphe.

3.2.2 Techniques mathématiques appliquées au graphe de cohérence par l'intermédiaire de la matrice d'incidence

Les problèmes sur la qualité de l'eau devenus des sujets d'actualité très étudiés, ont permis le développement de certaines techniques mathématiques. Entre autre, bien des modèles mathématiques ont aidé à prévoir et contrôler la pollution (Cheñ et Orlob, 1971). Mais ces modèles ne nous donnaient aucune indication sur la structure globale d'un système. Pour remédier à ce manque, Atkin (1974) introduisit un outil mathématique basé sur la topologie et qui permet l'analyse de la structure d'un système; on parle alors de "dynamique polyédrale".

Au cours des prochaines lignes, cette méthode est expliquée et appliquée à l'interprétation d'un graphe de cohérence. Cependant, elle n'est applicable qu'à une catégorie restreinte de graphes de cohérence. Suite à une certaine adaptation, on peut rejoindre un ensemble plus grand de ce graphe. Néanmoins, il demeure encore plusieurs cas où on ne peut l'utiliser. C'est ainsi que, pour couvrir tous les types de graphes de cohérence, nous avons mis au point une mesure, appelée "mesure d'importance" (voir paragraphe 3.2.2.2) qui nous permet de comparer les différentes causes d'un même niveau.

3.2.2.1 Méthode de la dynamique polyédrale

3.2.2.1.1 Graphes de cohérence à 2 niveaux

a) Définitions de base

Pour cette méthode, le système étudié est représenté par une forme géométrique multidimensionnelle appelée "complexe simplicial" (Atkin et Casti, 1977). Le système est traité comme une relation entre les éléments d'ensembles finis. Ainsi les variables sont divisées en 2 ensembles finis X et Y , entre lesquels il existe une relation binaire L . Cette relation correspond aux interactions entre certains éléments de X et certains éléments de Y .

Géométriquement, la relation L peut être représentée comme suit: les éléments x_1, x_2, \dots, x_n de X représentent les sommets d'un graphe appelé complexe simplicial et noté $K_Y(X;L)$, tandis que les éléments y_1, y_2, \dots, y_m de Y forment ce qu'on appelle les "simplexes". Un simplexe y_i est une forme géométrique reliant les éléments de X qui interagissent avec le y_i considéré. Ainsi, tous les simplexes qui forment le complexe $K_Y(X;L)$ sont définis par la relation L .

Cette relation L peut aussi être représentée par une matrice d'incidence A formée de 0 et 1. Ainsi, si $n=|X|$ et $m=|Y|$, la matrice d'incidence $A_{m \times n}$ selon la relation L est tel que:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } y_i \text{ est relié selon } L \text{ à } x_j, \quad i=1,2,\dots,m \\ & j=1,2,\dots,n \\ 0 & \text{autrement} \end{cases}$$

De plus, la relation inverse L^{-1} peut aussi être représentée par une forme géométrique et par une matrice d'incidence. De façon géométrique, les sommets du complexe $K_X(Y;L^{-1})$ deviennent les éléments de Y et les simplexes, les éléments de X . Quant à la représentation matricielle de L^{-1} , elle se fait par la transposition de la matrice d'incidence A que l'on note A^t . D'ailleurs, une étude complète d'un système doit aussi considérer cette relation inverse, si elle existe et selon le genre d'interprétation qu'on veut faire.

Par définition, la dimension q de chaque simplexe est le nombre d'éléments de X auxquels ils sont reliés selon L moins 1. Et la dimension du complexe $K_Y(X;L)$ (abrégé par K) est égale à celle du simplexe dans K dont la dimension est maximale (Atkin et Casti, 1977). Par convention, la notation standard σ_q représente un simplexe quelconque de dimension q . Ainsi, tous les simplexes du complexe K , de dimension q sont notés σ_q^i , $i=1,2,\dots,h_q$ où h_q = nombre de q -simplexes (simplexes de dimension q) dans K .

L'exemple suivant va aider à comprendre toutes ces définitions. Soit d'une part, l'ensemble des prédateurs $Y = \{\text{Hommes, lions, éléphants, oiseaux, poissons, chevaux}\} = \{y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6\}$ et soit d'autre part, l'ensemble des proies $X = \{\text{Antilopes, graines, porcs, bovins, herbe, feuil-}$

les d'arbres, insectes, reptiles} = $\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8\}$. La relation L est telle que le prédateur $y_i \in Y$ mange la proie $x_j \in X$, $i=1,2,\dots,6$ et $j=1,2,\dots,8$. Le graphe correspondant se retrouve à la figure 3.18 et la matrice d'incidence A , au tableau 3.2.

La relation L est l'ensemble des couples (y_i, x_j) et l'ensemble des sommets du complexe $K_Y(X;L)$ est $\{x_1, x_2, \dots, x_8\}$. Les simplexes de K et leur dimension respective sont:

$$y_1 = \langle x_1, x_2, x_3, x_4 \rangle : 3\text{-simplexe (tétraèdre)}$$

$$y_2 = \langle x_1, x_3 \rangle : 1\text{-simplexe (1 ligne)}$$

$$y_3 = \langle x_5, x_6 \rangle : 1\text{-simplexe (1 ligne)}$$

$$y_4 = \langle x_2, x_5, x_7, x_8 \rangle : 3\text{-simplexe (tétraèdre)}$$

$$y_5 = \langle x_7 \rangle : 0\text{-simplexe (1 point)}$$

$$y_6 = \langle x_2, x_5 \rangle : 1\text{-simplexe (1 ligne)}$$

À noter que, si nous avions eu un élément de Y relié à aucun élément de X , nous aurions eu un -1 -simplexe. Géométriquement, le complexe $K_Y(X;L)$ a la structure illustrée à la figure 3.19.

b) Mesures de connexité

Soient 2 simplexes σ_i et σ_j dans un complexe K . On dit qu'ils sont joints par un chemin de dimension q , s'il existe une suite finie de simplexes $\sigma_{\alpha_1}, \sigma_{\alpha_2}, \dots, \sigma_{\alpha_n}$ tous dans K , tel que (Casti et al., 1979):

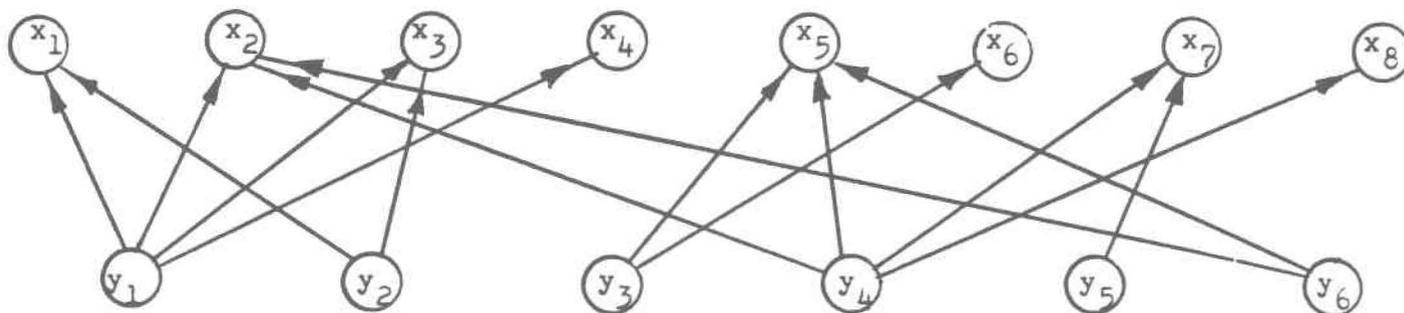


Figure 3.18: Graphe représentant les relations entre les prédateurs et les proies.

L	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
y_1	1	1	1	1	0	0	0	0
y_2	1	0	1	0	0	0	0	0
y_3	0	0	0	0	1	1	0	0
y_4	0	1	0	0	1	0	1	1
y_5	0	0	0	0	0	0	1	0
y_6	0	1	0	0	1	0	0	0

Tableau 3.2: Matrice d'incidence A , représentant la relation prédateur-proie L , illustrée à la figure 3.18.

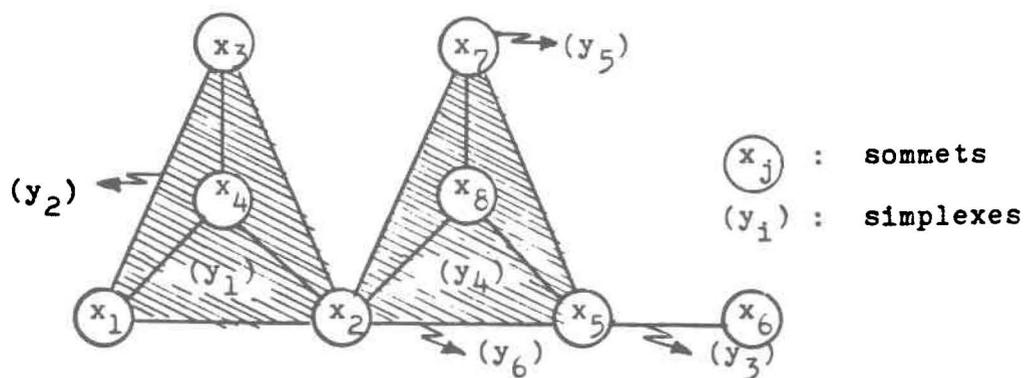


Figure 3.19: Forme géométrique du complexe simplicial $K_v(X;L)$ correspondant à la matrice d'incidence du tableau 3.2.

- i) σ_{α_1} soit une face¹ de σ_i
- ii) σ_{α_n} soit une face de σ_j
- iii) σ_{α_s} et $\sigma_{\alpha_{s+1}}$ partagent une face, $s=1,2,\dots,(n-1)$
- iv) $q = \min(i, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n, j)$

Un tel chemin est dit de longueur $(n-1)$.

Il est facile de vérifier que cette relation entre 2 simplexes σ_i et σ_j définit une relation d'équivalence² sur l'ensemble des simplexes de K . À partir de cela, on définit le vecteur de structure Q , comme étant le nombre de classes d'équivalence³ dans K , pour chaque valeur de q , $q=0,1,\dots, \dim K$. En d'autres termes, $Q_i =$ nombre de composantes connexes (voir définition p. 30) dans K selon la dimension i . Donc $Q = (Q_{\dim K} \dots Q_1 Q_0)$ et montre comment les éléments selon la relation L sont reliés les uns aux autres et à quels niveaux de dimension existent ces liens.

Par la suite, on définit le vecteur d'obstruction Θ ainsi: $\Theta = (Q-u)$ où $Q =$ vecteur de structure et $u =$ vecteur unité.

¹ Une face peut être une ligne, une surface, un volume, etc., selon la valeur de q considérée.

² Relation d'équivalence: une relation d'équivalence R sur un ensemble A est une relation R sur A tel que:

- i) aRa pour tout $a \in A$ (réflexivité)
- ii) $aRb \rightarrow bRa$ (symétrie)
- iii) aRb et $bRc \rightarrow aRc$ (transitivité)

³ Classes d'équivalence: une classe d'équivalence déterminée par a est l'ensemble des éléments de A donnant l'élément a selon la relation d'équivalence R sur l'ensemble A (Paley et Weichsel, 1966).

Comme on l'a vu précédemment, le vecteur de structure Q donne une information sur la structure de connexité du complexe K . Cependant, il ne renseigne aucunement sur chacun des simplexes de K . Une mesure pour indiquer le degré selon lequel chaque simplexe s'intègre dans le complexe K devient donc importante. Dans ce cas, une telle mesure pour un simplexe donné devrait tenir compte à la fois de:

- i) la dimension de σ , c'est-à-dire la façon dont les éléments sont reliés selon L dans le simplexe considéré;
- ii) le degré avec lequel σ est relié, c'est-à-dire la façon dont σ est intégré dans le complexe K .

Cette mesure appelée "excentricité" de σ et notée $\text{ecc}(\sigma)$ est définie ainsi:

$$\text{ecc}(\sigma) = \frac{q - q_{\max}}{q + 1_{\max}} \quad \text{où } q = \text{dimension du simplexe } \sigma = (\text{nombre de sommets}) - 1$$

q_{\max} = dimension maximale de la face partagée avec au moins un autre simplexe dans K .

Ainsi, on a $(q - q_{\max})$ = nombre maximum de sommets non partagés par σ avec au moins un autre simplexe de K

q_{\max} = (nombre maximum de sommets partagés par σ avec au moins un autre simplexe de K) - 1

$$\text{Donc } \text{ecc}(\sigma) = \frac{(\text{nb. max. de sommets non partagés par le même simplexe})}{(\text{nb. max. de sommets partagés par le même simplexe})}$$

Dans le calcul de l'excentricité, le dénominateur $(q_{\max} + 1)$ ne sert qu'à normaliser la mesure afin de permettre une comparaison. En effet, le résultat $(q - q_{\max}) = 2$ est plus révélateur si $q_{\max} = 1$ que si $q_{\max} = 10$. D'où l'obligation d'en faire une valeur relative.

c) Interprétation des mesures définies

On a vu que le vecteur de structure Q donnait une information sur la connexité globale du système. Par conséquent, le vecteur d'obstruction θ donne le même renseignement, mais de façon plus précise, il donne le nombre de barrière pour chaque niveau de dimension. Ainsi, si θ est le vecteur nul, cela signifie qu'il n'y a aucune barrière qui divise le système et ce, pour toutes les dimensions. Donc, à tous les niveaux, le complexe est bien intégré, et tous les simplexes sont reliés les uns aux autres.

Quant à l'excentricité, celle-ci traite chaque simplexe individuellement. Cette mesure montre comment le simplexe est le seul à provoquer ses effets. Ainsi plus une autre cause touche les effets du simplexe étudié, plus le nombre de sommets non partagés avec un même simplexe sera petit. C'est en quelque sorte une mesure d'unicité.

Par conséquent, si un simplexe n'est relié à aucun autre simplexe, son excentricité est infinie. Au contraire, s'il existe un autre simplexe similaire à celui étudié, c'est-à-dire touchant au moins les mêmes effets, son excentricité devient nulle. On dit, de plus, qu'un système est homogène, si les simplexes d'un complexe ont sensiblement la même excentricité.

En continuant l'exemple présenté précédemment (voir pages 54 à 56), ces dernières notions deviendront plus faciles à comprendre.

La construction du vecteur de structure Q se fait tout d'abord en déterminant les ensembles de simplexes situés dans la même composante q -connexe. Ainsi, l'étude des dimensions 3 et 2 montre que les simplexes y_1 et y_4 peuvent être considérés, étant les seuls avec une dimension égale ou supérieure à 3 et 2. De plus, ils n'ont au maximum qu'un sommet commun ne pouvant donc être classés dans le même ensemble. Il aurait fallu 4 sommets communs pour que y_1 et y_4 puissent être dans la composante 3-connexe et 3 sommets communs pour être dans la composante 2-connexe. Cependant au niveau dimensionnel 1, c'est-à-dire pour les simplexes contenant 2 sommets ou plus, sont considérés les simplexes y_1, y_2, y_3, y_4 et y_6 . Les simplexes y_1 et y_2 ont 2 sommets communs étant par le fait même classés dans le même ensemble; y_4 et y_6 en ont aussi 2 en commun formant un deuxième ensemble 1-connexe, tandis que y_3 n'a au maximum qu'un seul sommet commun avec un autre simplexe, se retrouvant ainsi seul dans son ensemble. Enfin, à la dimension 0 tous les simplexes se retrouvent dans le même ensemble ayant chacun un sommet commun avec un autre simplexe, qui lui-même peut avoir un sommet commun avec un autre simplexe. Les éléments du vecteur de structure Q donne le nombre d'ensembles situés dans la même composante q -connexe. On obtient le tableau suivant:

niveaux q	Ensembles de simplexes dans la même composante connexe	Éléments du vecteur Q
3	$\{y_1\}, \{y_4\}$	2
2	$\{y_1\}, \{y_4\}$	2
1	$\{y_1, y_2\}, \{y_3\}, \{y_4, y_6\}$	3
0	$\{y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6\}$	1

Donc $Q = (2 \ 2 \ 3 \ 1)$ et $\theta = Q - (1 \ 1 \ 1 \ 1) = (1 \ 1 \ 2 \ 0)$; où le premier élément des vecteurs correspond au niveau 3 et le dernier élément au niveau 0.

L'application de la formule du calcul des excentricités donne les résultats suivants:

$$y_1 = \langle x_1, x_2, x_3, x_4 \rangle ; \text{ecc}(y_1) = (3-1)/(1+1) = 2/2 = 1$$

$$y_2 = \langle x_1, x_3 \rangle ; \text{ecc}(y_2) = (1-1)/(1+1) = 0/2 = 0$$

$$y_3 = \langle x_5, x_6 \rangle ; \text{ecc}(y_3) = (1-0)/(0+1) = 1/1 = 1$$

$$y_4 = \langle x_2, x_5, x_7, x_8 \rangle ; \text{ecc}(y_4) = (3-1)/(1+1) = 2/2 = 1$$

$$y_5 = \langle x_7 \rangle ; \text{ecc}(y_7) = (0-0)/(0+1) = 0/1 = 0$$

$$y_6 = \langle x_2, x_5 \rangle ; \text{ecc}(y_6) = (1-1)/(1+1) = 0/2 = 0$$

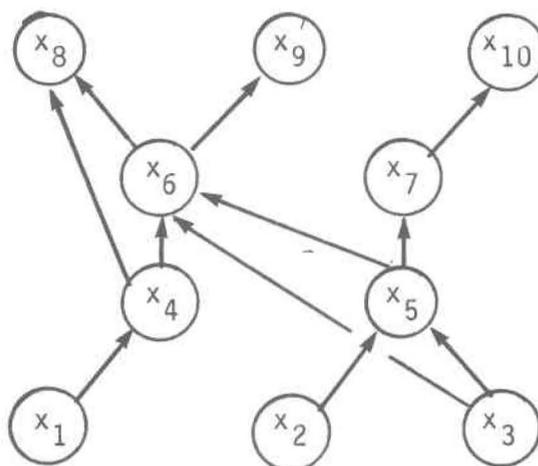
Le vecteur d'obstruction θ démontre qu'au niveau 0 le système est bien intégré. En effet, le graphe de la figure 3.18 montre que toutes les proies (x_j) mangées par chaque prédateur (y_i) sont aussi mangées par au moins un autre simplexe. De plus, le complexe illustré à la figure 3.19

montre que tous les simplexes ont au moins un point commun, donc aucune barrière au niveau de 0. De plus, cette figure montre que les simplexes y_1 et y_4 partagent un côté avec respectivement les simplexes y_2 et y_6 tandis que les autres simplexes n'ont qu'un point en commun. Nous avons donc 2 barrières au niveau 1, soient 3 ensembles disjoints pour les simplexes de dimension supérieure à 0. Pour les simplexes de dimension supérieure à 1, soient y_1 et y_4 , ceux-ci n'ont qu'un seul point en commun; il existe donc une barrière qui sépare ces simplexes pour les niveaux 2 et 3.

Les valeurs d'excentricité montrent une certaine homogénéité dans le système. Donc, chacun des prédateurs est bien intégré dans l'écosystème. Si cette excentricité représente une mesure de flexibilité et de capacité pour une espèce à absorber des changements sans trop de grandes conséquences, les simplexes y_1 , y_3 et y_4 semblent plus résistants face à certaines variations. En effet, pour ces prédateurs, le calcul de leur excentricité démontre une source de nourriture un peu plus unique tout en étant sensiblement plus variée par rapport aux autres. Ceci n'est qu'une interprétation très sommaire. Des connaissances supplémentaires sur l'écosystème étudié et une étude plus approfondie donneraient certainement des indications plus précises.

d) Application au graphe de cohérence

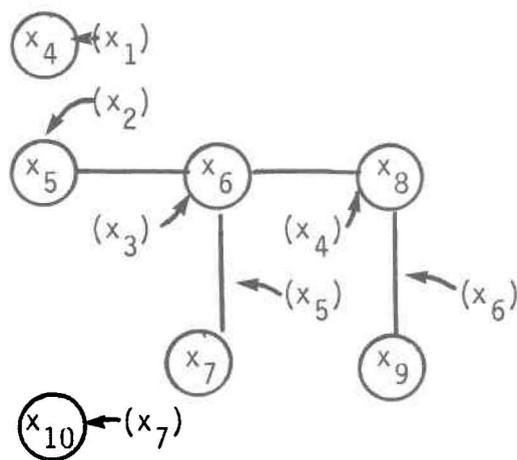
La vérification de l'application de la dynamique polyédrale au graphe de cohérence, se fera à l'aide d'un exemple. Soit le graphe de cohérence suivant:



La relation L est défini comme étant tout lien de cause à effet entre deux éléments x_i du graphe ($i = 1, 2, \dots, 10$); X devient l'ensemble des effets et Y l'ensemble des causes. On a donc $X = \{x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}\}$ et $Y = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7\}$. La matrice d'incidence associée au graphe de cohérence, selon la relation L devient la suivante:

L	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}
x_1	1	0	0	0	0	0	0
x_2	0	1	0	0	0	0	0
x_3	0	1	1	0	0	0	0
x_4	0	0	1	0	1	0	0
x_5	0	0	1	1	0	0	0
x_6	0	0	0	0	1	1	0
x_7	0	0	0	0	0	0	1

Le complexe simplicial $K_Y(X;L)$ correspondant à la matrice d'incidence précédente pourrait être représenté ainsi :



où (x_i) : sommets
 (x_j) : simplexes

Les simplexes, leur dimension respective ainsi que le calcul de leur excentricité sont les suivants :

- $x_1 = \langle x_4 \rangle$: 0-simplexe (point); $\text{ecc}(x_1) = 1/0 = \infty$
 $x_2 = \langle x_5 \rangle$: 0-simplexe (point); $\text{ecc}(x_2) = 0/1 = 0$
 $x_3 = \langle x_5, x_6 \rangle$: 1-simplexe (ligne); $\text{ecc}(x_3) = 1/1 = 1$
 $x_4 = \langle x_6, x_8 \rangle$: 1-simplexe (ligne); $\text{ecc}(x_4) = 1/1 = 1$
 $x_5 = \langle x_6, x_7 \rangle$: 1-simplexe (ligne); $\text{ecc}(x_5) = 1/1 = 1$
 $x_6 = \langle x_8, x_9 \rangle$: 1-simplexe (ligne); $\text{ecc}(x_6) = 1/1 = 1$
 $x_7 = \langle x_{10} \rangle$: 0-simplexe (point); $\text{ecc}(x_7) = 1/0 = \infty$

Maintenant déterminons le vecteur de structure Q et en même temps le vecteur d'obstruction θ .

Dimension q	Ensembles des simplexes dans la même composante connexe	Q
1	$\{x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}$	4
0	$\{x_4\}, \{x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}, \{x_7\}$	3

$$Q = (4 \ 3) \text{ et } \theta = (3 \ 2).$$

Le θ calculé montre un graphe qui n'est pas très interrelié laissant croire à une indépendance de la part de certains éléments. Et ces éléments seraient les simplexes x_1 et x_7 qui forment chacun un ensemble 0-connexe. En plus, ils ont tous les deux une excentricité infinie, laquelle excentricité indique le degré d'intégration du simplexe au sein du complexe.

Tous ces calculs permettent de voir comment est relié chaque simplexe par rapport au complexe. Cependant ils ne considèrent aucunement l'emplacement du simplexe à l'intérieur du graphe. Ainsi ils ne tiennent pas compte des liens antérieurs ou postérieurs. Le meilleur exemple est les simplexes x_1 et x_7 qui sont mis sur le même pied alors que x_1 est situé au bas du graphe atteignant de façon directe et indirecte quatre autres éléments, tandis que x_7 est situé sur le troisième niveau du graphe ne touchant qu'un seul effet.

Cet exemple a servi à démontrer que la dynamique polyédrale ne peut être appliquée que pour une relation impliquant un chemin de longueur 1 à la fois, c'est-à-dire une relation entre uniquement deux éléments. On ne peut donc appliquer cette méthode qu'à un graphe à deux niveaux où tous les effets sont directs. Il est évident que cette technique peut être utilisée pour l'interprétation de tout graphe de cohérence à deux niveaux. Mais ce type de graphe constitue un ensemble très restreint.

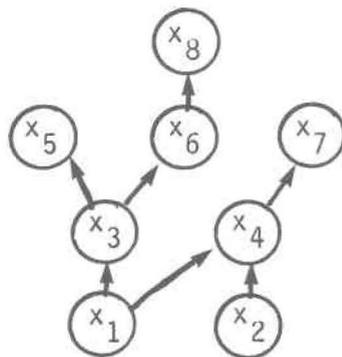
3.2.2.1.2 Adaptation pour les graphes de cohérence à n-niveaux reliés

L'impossibilité d'utiliser la méthode de la dynamique polyédrale telle quelle à tout graphe de cohérence oblige une certaine adaptation afin de pouvoir couvrir au moins tous les graphes de cohérence à n-niveaux reliés. On parle, dans ce cas, de graphes de cohérence dont toutes les causes premières ont obligatoirement un effet direct situé sur le 2ⁱème niveau, lequel peut avoir un autre effet mais situé sur le 3ⁱème niveau et ainsi de

suite. Ainsi, toutes les causes sur un même niveau ont automatiquement un ou plusieurs effets tous situés sur le niveau suivant.

Alors, si on veut une information complète sur un tel graphe, la formation des 2 ensembles comparés X (ensemble des sommets) et Y (ensemble des simplexes) est quelque peu modifiée. En effet, l'ensemble Y doit contenir tous les éléments qui sont des causes, donc les éléments sur le niveau 1 et une partie ou tous ceux des niveaux 2 à $(n-1)$. Quant à l'ensemble X , il doit inclure les éléments qui sont des effets, c'est-à-dire les éléments des niveaux 2 à n . Ces 2 ensembles ne sont pas disjoints et sont, bien entendu, reliés selon une relation binaire L . Pour la définition des 2 ensembles selon la relation inverse L^{-1} , nous obtenons la transposition.

Concernant le calcul de l'excentricité d'un simplexe qui, dans ce cas, serait appelée "excentricité totale", la composition de fonction sur tous les simplexes concernés dans le cheminement à travers le graphe à partir du simplexe considéré, serait une solution à envisager. Cependant, la comparaison des simplexes seulement entre ceux d'un même niveau serait préférable. Ainsi, pour le graphe à 4 niveaux reliés suivant:



l'excentricité totale du simplexe x_1 , notée $\text{ecc}_t(x_1)$, serait calculée comme suit:

$$x_1 = \langle x_3, x_4 \rangle : \text{ecc}(x_1) = a$$

$$x_3 = \langle x_5, x_6 \rangle : \text{ecc}(x_3) = b$$

$$x_6 = \langle x_8 \rangle : \text{ecc}(x_6) = c$$

$$x_4 = \langle x_7 \rangle : \text{ecc}(x_4) = d$$

x_5 , x_7 et x_8 ne sont pas des simplexes puisqu'ils n'ont pas d'effets

$$\rightarrow \text{ecc}_t(x_1) = a + b + c + d$$

Cependant, si un des simplexes retrouvés sur le chemin à partir du simplexe dont on veut calculer l'excentricité totale, a une excentricité ∞ , alors à lui seul il définit l'excentricité totale. Pour éviter cette absorption, un remaniement au niveau du calcul de l'excentricité s'impose. Une excentricité infinie implique un dénominateur ($q_{\max} + 1$) nul. Comme ce dénominateur ne sert qu'à normaliser et que la valeur minimum possible pour q_{\max} est -1 , en lui ajoutant 1 , on ne change pas le sens de cette mesure et on élimine le cas ∞ . L'excentricité serait donc calculée ainsi:

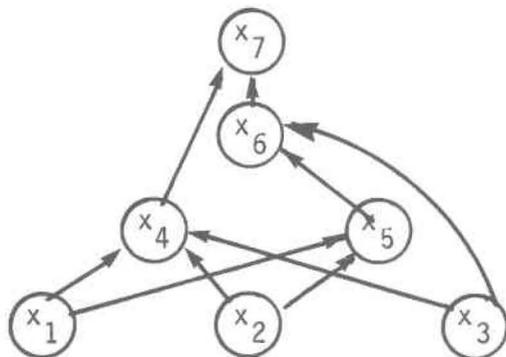
$$\text{ecc}_t(\sigma) = \frac{q - q_{\max}}{q_{\max} + 2} = \frac{(\text{nb. de sommets non partagés par le même simplexe})}{(\text{nb. de sommets partagés par le même simplexe}) + 1}$$

Cette nouvelle mesure, qu'est l'excentricité totale (ecc_t) a une interprétation similaire à celle utilisée auparavant. Mais, en plus de donner une information sur l'unicité des effets d'un simplexe, elle considè-

re aussi la longueur du chemin qui traverse tout le graphe. Ainsi, cette valeur est liée au nombre total d'éléments touchés de façon directe et indirecte tout en considérant l'unicité de ces effets. On peut donc dire que cette mesure donne un indice de l'importance de la cause par rapport à celles retrouvées sur le même niveau. Cependant, l'interprétation de cette nouvelle mesure est plutôt intuitive. Elle aurait avantage à être appuyée par des preuves mathématiques.

Pour ce qui est des vecteurs de structure et d'obstruction, il faudrait trouver une façon d'utiliser ces notions pour l'interprétation de graphes de cohérence à n-niveaux reliés. Mais ces 2 derniers points ne seront pas traités à l'intérieur de ce mémoire. Malgré tout, l'application de cette méthode d'interprétation demeure, encore là, réduite à un ensemble de graphes de cohérence à n-niveaux reliés. En effet, l'exemple qui suit démontre bien l'impossibilité de l'étendre au cas général.

Soit donc le graphe de cohérence à 4 niveaux non tous reliés suivant:



La matrice d'incidence et les calculs pour l'excentricité totale de chaque simplexe sont:

γ x	x_4	x_5	x_6	x_7	$\text{ecc}(\sigma)$	$\text{ecc}_t(\sigma)$
x_1	1	1	0	0	0	0
x_2	1	1	0	0	0	0
x_3	1	0	1	0	1	1
x_4	0	0	0	1	0	0
x_5	0	0	1	0	0	0
x_6	0	0	0	1	0	0

Dans cet exemple, le simplexe x_3 prend la valeur maximale pour l'excentricité totale, c'est-à-dire pour la mesure d'unicité. Pourtant tous les effets provoqués par x_3 le sont aussi par x_1 et x_2 . Les valeurs $\text{ecc}_t(x_1)$ et $\text{ecc}_t(x_2)$ devraient donc être supérieures ou égales à celle obtenue pour x_3 , ce qui n'est pas le cas. Ceci vient du fait que x_3 est le seul simplexe du premier niveau à avoir un de ses effets directs situé sur le 3ième niveau. Alors la définition d'une autre mesure permettant l'interprétation de tout graphe de cohérence à n -niveaux devient nécessaire.

3.2.2.2 Mesure d'importance, définition et interprétation

Au départ, nous voulions trouver une technique de calcul qui puisse permettre de mesurer la valeur relative de chaque cause afin de pouvoir les comparer entre elles, mais toujours pour un seul niveau à la fois. L'objectif de ce calcul est de déterminer l'importance relative de chaque

cause. Pour ce, il fallait tenir compte du nombre de sommets ou effets touchés par une cause de façon directe et indirecte, en plus de considérer le nombre de causes provoquant les mêmes effets. Une mesure d'importance pour la cause x_j , notée $m(x_j)$ a été défini de la façon suivante:

$$m(x_j) = \sum_i \frac{1}{d^-(x_i)}$$

où x_i = effets touchés par la cause x_j , $i \neq j$

$d^-(x_i)$ = degré intérieur de x_i , c'est-à-dire le nombre d'arcs qui arrivent à l'effet x_i

Afin de considérer le nombre d'effets retrouvés sur le cheminement à travers tout le graphe à partir d'une cause x_j , la mesure d'importance totale, notée $M(x_j)$ a été définie ainsi:

$$M(x_j) = m(x_j) + \sum_p m(x_p)$$

où x_p = tous les effets directs et indirects atteints par x_j .

En résumé la mesure d'importance totale de x_j somme les mesures d'importance de toutes les causes reliées par tous les chemins dont le point de départ est x_j . Ainsi la mesure d'importance totale d'une cause peut être définie comme étant sa mesure d'importance additionnée à la somme des mesures d'importance totale de ses effets directes. La formule initiale devient donc:

$$M(x_j) = m(x_j) + \sum_q M(x_q)$$

où x_q = tous les effets directs (seulement) atteints par x_j .

En commençant par les causes finales, le calcul est simplifié.

Avec l'exemple cité à la page 69, ces nouvelles définitions donnent les résultats suivants:

x_j	x_4	x_5	x_6	x_7	$m(x_j)$	$M(x_j)$
x_1	1	1	0	0	$1/3+1/2$	$5/6+1/2+1 = 2 \frac{1}{3}$
x_2	1	1	0	0	$1/3+1/2$	$5/6+1/2+1 = 2 \frac{1}{3}$
x_3	1	0	1	0	$1/3+1/2$	$5/6+1/2+1/2=1 \frac{5}{6}$
x_4	0	0	0	1	$1/2$	$1/2 = 1/2$
x_5	0	0	1	0	$1/2$	$1/2+1/2 = 1$
x_6	0	0	0	1	$1/2$	$1/2 = 1/2$
$d^-(y_i)$	3	2	2	2		

Ici, on voit plus facilement que les causes x_1 et x_2 ont la même importance, touchant exactement les mêmes effets. De plus, x_1 et x_2 semblent plus importants que x_3 . En effet, en enlevant la cause x_1 ou x_2 , les effets x_4 , x_5 , x_6 et x_7 seraient aussi réduits, tandis que la disparition de la cause x_3 diminuerait seulement les effets x_4 , x_6 et x_7 . L'avantage de

cette méthode de calcul vient du fait qu'elle peut être appliquée au cas général, soit à tout graphe de cohérence à n-niveaux.

Cependant, il faut garder à l'esprit que les valeurs touchées ne donnent qu'un indice, car cette méthode ne tient pas compte de la pondération pour chaque lien. Elle donne une information partielle ne considérant pas l'importance du lien entre une cause et un effet. Mais cette information peut, quand même, être d'une certaine utilité. En effet, dans la planification d'un projet, cette technique mathématique permettrait de connaître l'action qui aurait tendance à être la plus dommageable (dont la mesure d'importance totale est maximale) et ainsi tenter d'en réduire les effets. Mais cette interprétation n'a de sens que si les effets sont tous négatifs. Si au contraire, ils sont tous positifs, alors on peut rechercher l'action la plus bénéfique (mesure d'importance totale maximale) ou à l'inverse celle la moins bénéfique (mesure d'importance minimale). Et si un graphe de cohérence contient un mélange d'effets positifs et négatifs, il suffit d'en faire 2 graphes distincts, l'un contenant les effets positifs et l'autre les effets négatifs. Chacun est traité individuellement et, par la suite, les résultats obtenus sont comparés. Afin de mieux saisir le sens de cette mesure d'importance totale, elle sera appliquée aux graphes de cohérence de l'implantation de barrages hydroélectriques sur la rivière Chamouchouane.

CHAPITRE 4

ÉTUDE D'UN CAS: HARNACHEMENT D'UNE RIVIÈRE À DES FINS HYDRO-ÉLECTRIQUES

CHAPITRE 4:

ÉTUDE D'UN CAS: HARNACHEMENT D'UNE RIVIÈRE À DES FINS HYDRO-ÉLECTRIQUE

La mise à l'essai d'une nouvelle méthode d'identification et d'évaluation des impacts est une étape essentielle dans son processus de développement. La façon de procéder se traduit généralement par une application de la méthode à un cas concret. La méthode du graphe de cohérence n'échappe pas à la règle.

L'exemple retenu fait référence à un secteur de pointe au Québec soit l'aménagement d'une rivière à des fins hydro-électriques. Plus spécifiquement, c'est le projet d'harnachement de la rivière Chamouchouane au lac Saint-Jean qui a été choisi. L'application du graphe de cohérence à cet exemple présente des étapes qui sont calquées sur le schéma générale de réalisation d'une étude d'impact. Ainsi, on retrouve dans les pages qui suivent une description du projet comme tel, une description de la région touchée et finalement une identification des impacts.

4.1 Description du projet

C'est en 1970, qu'Hydro-Québec commença sérieusement à envisager la possibilité d'harnacher la rivière Chamouchouane, à des fins de production hydro-électrique (Anonyme, 1980 a). En juillet 1973, la Direction des

projets de centrales d'Hydro-Québec, présentait un premier rapport, faisant état de 3 variantes principales et de 6 sous-variantes d'aménagement du projet (Roche ass., 1981). Les études se poursuivirent et on limita bientôt le choix à 2 variantes, identifiées variante I et variante II.

Aujourd'hui encore, ce sont toujours ces deux mêmes variantes qui retiennent l'attention. En bref, la variante I comprend la construction de 4 centrales en série sur la rivière Chamouchouane, avec emmagasinement au bassin de retenue de la centrale de tête CH₄ (Roche ass., 1981) (fig. 4.1). La variante II, quant à elle, comporte l'érection de 3 centrales en série sur la rivière Chamouchouane, avec un réservoir d'emmagasinement situé sur la rivière Nestaocano en amont de la centrale CH₃ (fig. 4.2). Il faut cependant souligner, que lors de la parution du rapport de 1973, l'Hydro-Québec affichait implicitement sa préférence à l'endroit de la variante I, en allouant à la variante II, un rôle de solution de rechange à la variante I¹.

C'est en se basant sur cet intérêt de la part d'Hydro-Québec, et aussi en considérant le fait que la présente étude vise plus à mettre à l'épreuve une nouvelle méthode d'évaluation d'impacts, que de faire le procès des différentes solutions proposées, que nous avons choisi de traiter la variante I en exclusivité dans les pages suivantes. Selon cette variante, la réalisation du complexe hydro-électrique de la rivière Chamouchouane

¹ Suite à des informations obtenues de M. Jean-Robert Sabourin, chargé d'avant-projet pour la rivière Chamouchouane, la variante I demeure encore celle qui a le plus de chances d'être retenue par l'Hydro-Québec (Sabourin, 1981).

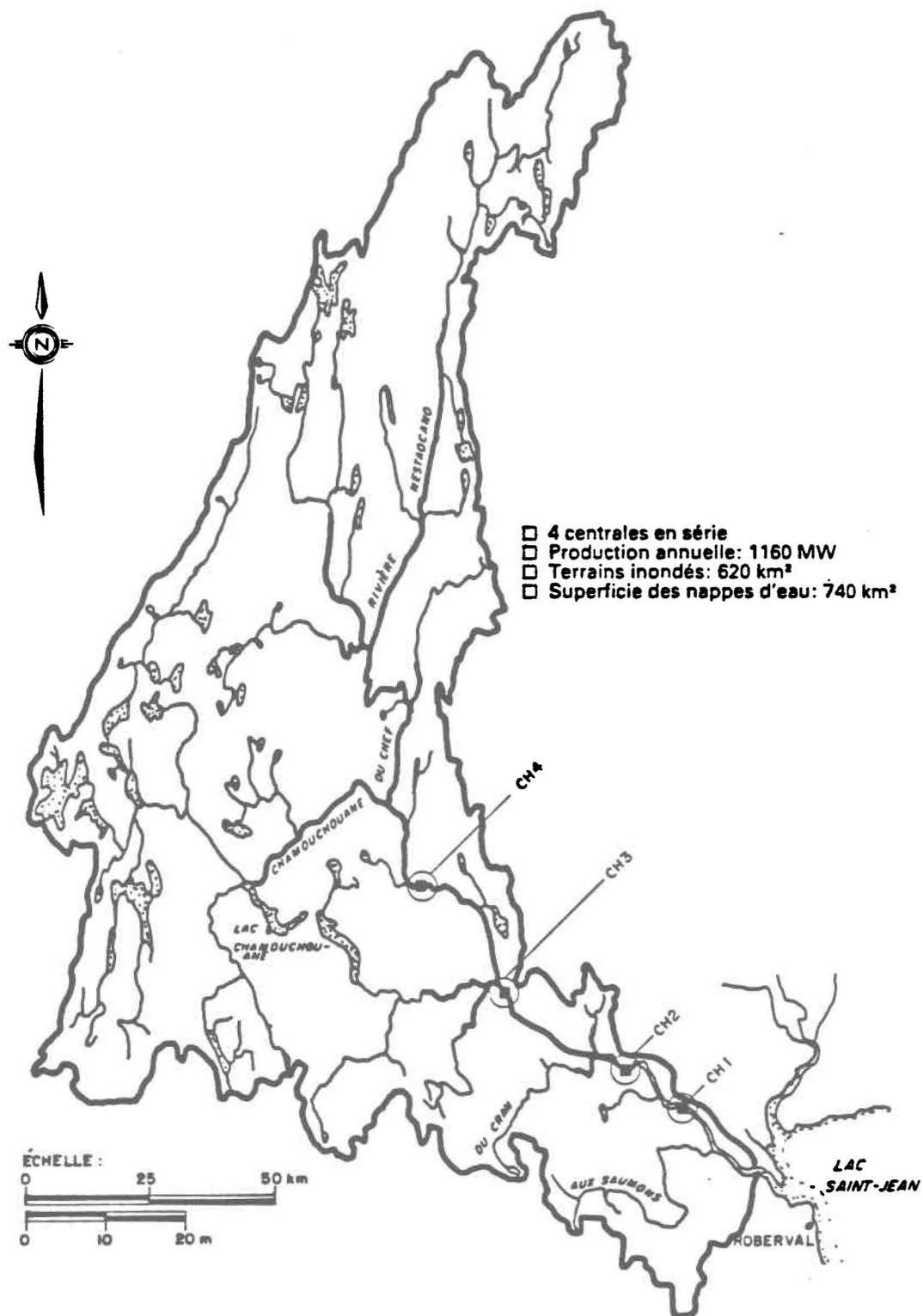


Figure 4.1: Harnachement de la rivière Chamouchouane: variante I

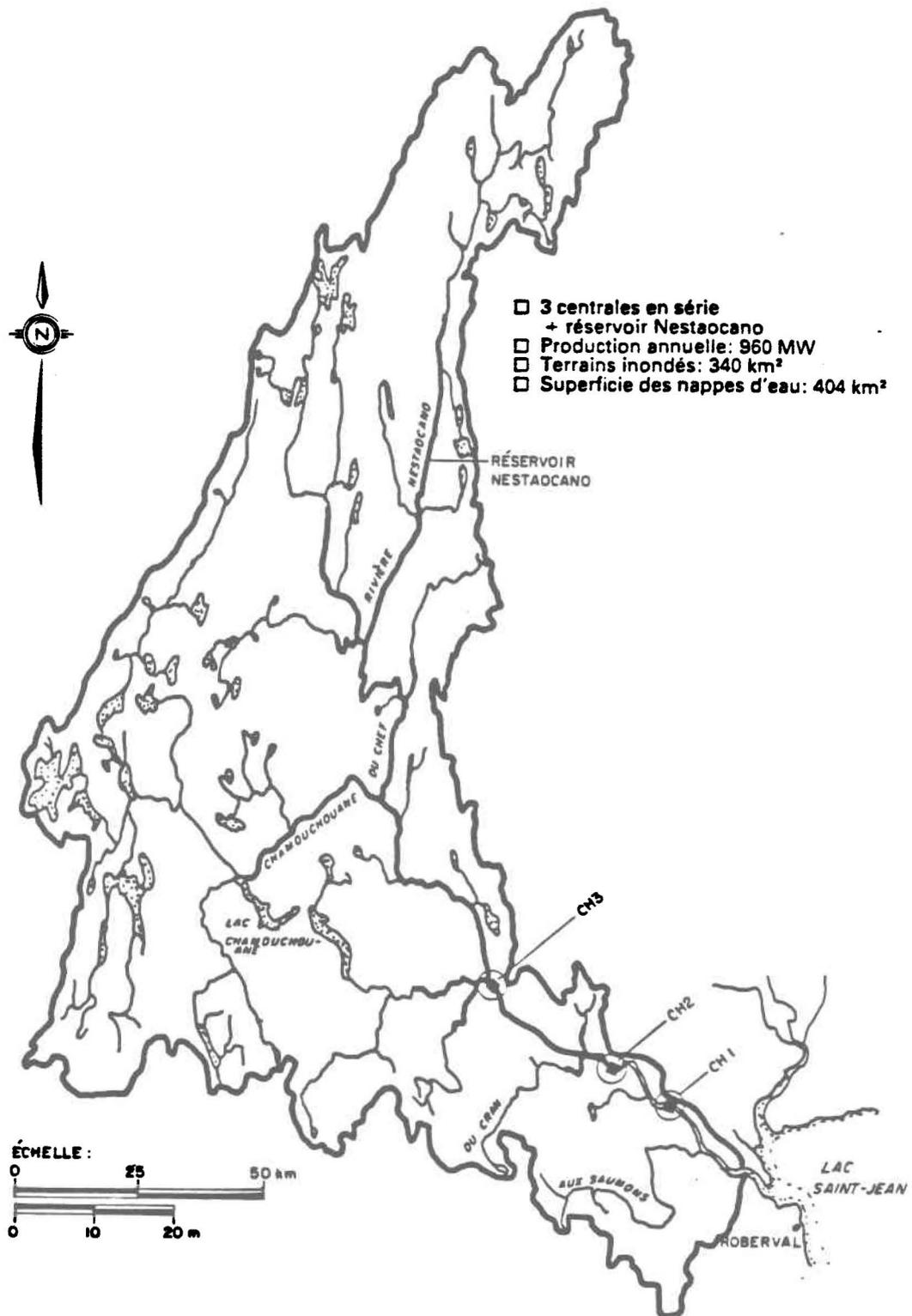


Figure 4.2: Harnachement de la rivière Chamouchouane: variante II

nécessite la construction de 3 types d'ouvrages bien précis: les ouvrages de dérivations provisoires du cours d'eau, les ouvrages de retenue et de régularisation ainsi que les ouvrages de production hydro-électrique à proprement parler.

4.1.1 Ouvrages de retenue et de régularisation

On retrouve sous ce titre, tous les barrages et digues, qui sont nécessaires à la création d'une réserve d'eau, permettant d'alimenter à l'année et de façon continue, les ouvrages de production hydro-électrique. Au total, 4 barrages et 6 digues sont décrits dans la variante I. Le tableau 4.1 donne les caractéristiques des différents barrages prévus.

Chacun des barrages est équipé d'un évacuateur de crues, qui permet d'éliminer tout surplus d'eau excédant la cote maximale de retenue. Ces évacuateurs sont construits en béton, et comportent, chacun, 3 ouvertures de dimensions variables selon les aménagements. Sauf au site de CH₂, la construction d'un certain nombre de digues s'avère nécessaire afin d'empêcher tout déversement d'eau dans des secteurs moins élevés (Roche ass., 1981). Le détail de ces digues se retrouve au tableau 4.2.

L'action combinée des barrages et des digues entraîne la formation de nappes d'eau totalisant 739,5 km² de surface. En terme de volume, notons seulement que le réservoir derrière CH₄ a une capacité de 5,9 x 10⁹ m³

Tableau 4.1: Caractéristiques des différents barrages

Barrages	Emplacement	Type	Hauteur max. (m)	Longueur totale (m)
CH ₁	Grande chute à l'ours	Béton	36,6	426,7
CH ₂	Rapide Pémonka	Enrochement avec noyau de till	67,0	472,4
CH ₃	Chute de la chaudière	Enrochement avec noyau de till	57,9	492,0
CH ₄	4 km en amont des rapides du fer à cheval	Enrochement avec noyau de till	88,4	792,5

Tableau 4.2: Caractéristiques des différentes digues

Sites	Nombre de digues	Type	Longueur totale (m)	Gammes de hauteur (m)
CH ₁	2	Enrochement	1,828,7	19,8 à 25,9
CH ₂	-1	-1	-1	-1
CH ₃	2	Enrochement	548,6	6,1 à 10,6
CH ₄	2	Enrochement	426,7	13,7 à 25,9

1 Aucune digue n'est prévue dans le cas de CH₂.

d'eau, lorsque la cote maximale est atteinte. La mise en eau des réservoirs implique l'inondation de 625 km² de terrain. De ce chiffre, 246 km² sont exposés au phénomène de marnage, qui se produit exclusivement au réservoir de tête (CH₄). En terme de hauteur, cela représente une variation de plus de 11 m (Anonyme, 1980 b; Roche ass., 1981).

4.1.2 Ouvrages de production hydro-électrique

L'exploitation des 258 m de chute, entre CH₁ et CH₄ est réalisable grâce à l'installation de 4 centrales, situées aux différents sites du projet (Anonyme, 1980 b) (tableau 4.3). Les centrales CH₁ et CH₄ sont en surface, alors que celles situées à CH₂ et CH₃ sont souterraines (Roche ass., 1981).

Dépendant du facteur d'utilisation choisi, la puissance totale installée varie de 737 MW (F.U. 0,80) à 1106 MW (F.U. 0,53). Dans le premier cas, chaque centrale est équipée de 2 groupes, alors que dans le second cas on parle de 3 groupes. Le turbinage aux différentes centrales permet une production annuelle d'énergie de 5,17 x 10⁹ kwh (F.U. 0,80) (Roche ass., 1981).

4.1.3 Ouvrages de dérivation

La construction des ouvrages précédemment décrits nécessite la mise à sec de certaines portions de la rivière Chamouchouane. À cette fin,

Tableau 4.3: Hauteur de chute aux différents sites

Site	Hauteur de chute (m)
CH ₁	47
CH ₂	53
CH ₃	75
CH ₄	82

Hydro-Québec procède à l'installation de batardeaux (enrochement avec noyau de till) à l'amont et à l'aval des sites de construction. Le cours d'eau est alors dévié vers des galeries excavées dans le roc. Le tableau 4.4, reproduit les caractéristiques de ces galeries aux différents emplacements (Roche ass., 1981).

4.1.4 Autres détails

La réalisation d'un complexe hydro-électrique aussi important que celui de la rivière Chamouchouane, exige une quantité considérable de différents matériaux. Le tableau 4.5 donne une approximation des quantités nécessaires et ce, pour chaque type de matériau. Pour des raisons économiques et pratiques, ces matériaux proviennent en grande partie de la région même.

4.2 Description de la région

La rivière Chamouchouane se classe au troisième rang des tributaires du lac Saint-Jean derrière la Mistassini et la Péribonka. Son bassin de drainage, d'une superficie de 15 723,5 km², représente 22% du bassin total d'alimentation du lac Saint-Jean (figure 4.3). De son embouchure jusqu'au lac Chamouchouane, elle mesure près de 192 km de long. Son bassin de drainage est cependant beaucoup plus long, puisqu'il touche aux sources du lac Albanel, à son extrémité nord. Le lac Albanel est situé au nord-ouest du bassin de la rivière Chamouchouane.

Tableau 4.4: Caractéristiques des galeries de dérivations provisoires

	CH ₁	CH ₂	CH ₃	CH ₄
Longueur (galerie) (m)	488	396	427	457
Capacité (m ³ /s)	2 575	2 250	2 435	2 150

Tableau 4.5: Quantité de matériaux nécessaires à la réalisation du complexe Hydro-Électrique Chamouchouane

Matériaux	Quantité
Béton	630 540 t
Matériaux d'excavation	2 254 882 m ³
Matériaux de remblai (emprunt)	11 390 246 m ³
Bois	indéterminé

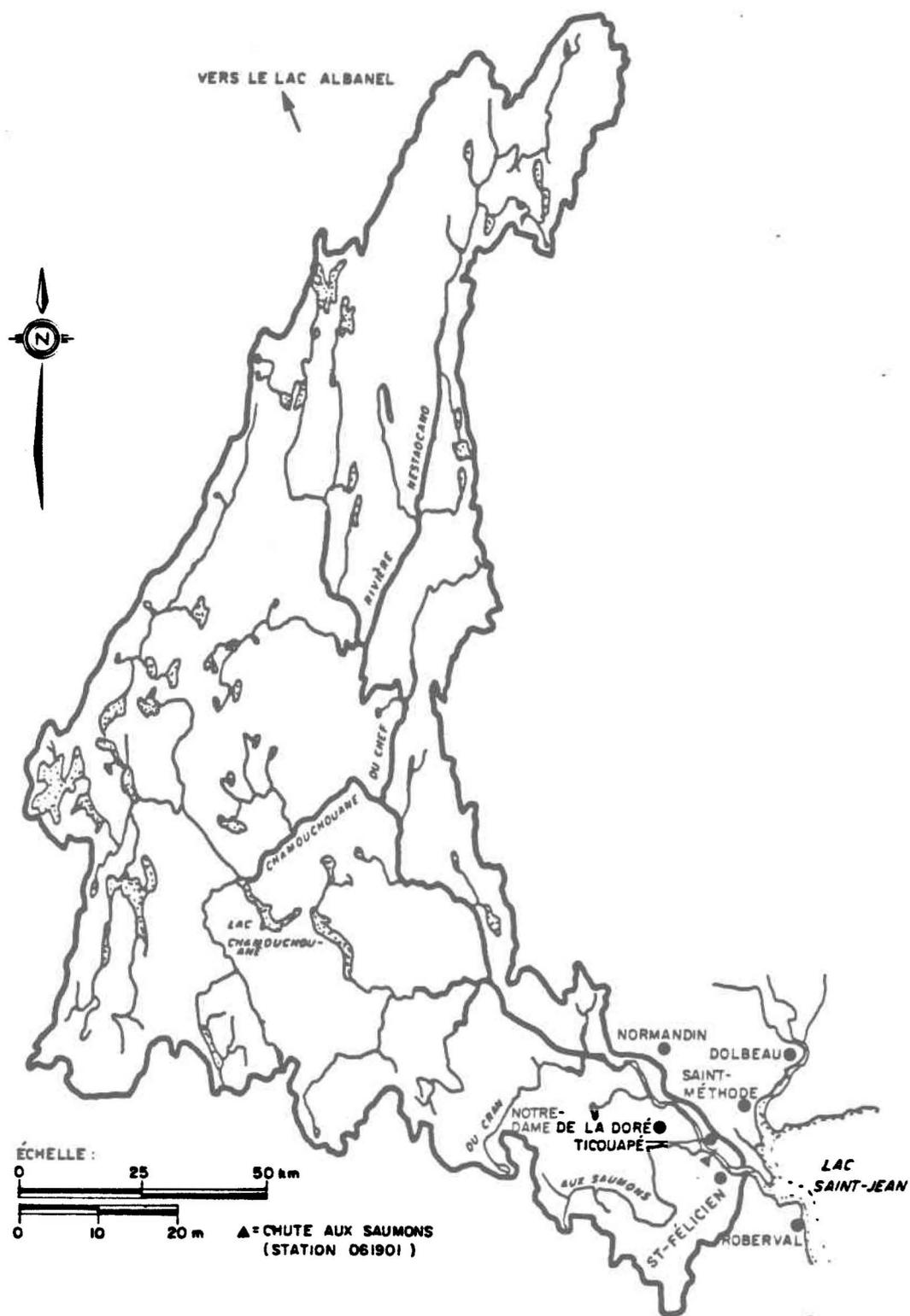


Figure 4.3: Bassin de drainage de la rivière Chamouchouane et municipalités environnantes

4.2.1 Géomorphologie du bassin versant

Le bassin de la rivière Chamouchouane repose entièrement sur des formations précambriennes du Bouclier canadien. Sur le plan géologique, cette partie du bouclier appartient à la province de Grenville, vieille de 955 millions d'années. Cette dernière est surtout formé de roches métamorphiques et éruptives telles le gneiss granitique, le quartzite, l'amphibolite, le gneiss à feldspath, l'hornblende et le pyroxène (S.A.G.E. Ltée, 1980).

Au point de vue physiographique, le territoire parcouru par la rivière Chamouchouane appartient à deux unités différentes: le plateau laurentien, appelé hautes terres, et les basses terres argileuses. L'emplacement de CH₂ correspond approximativement à la limite entre ces deux unités (Lupien, Rosenberg et Ass. Inc. 1979; Anonyme, 1980 b).

4.2.1.1 Hautes Terres

Situées au nord de CH₂, les hautes terres présentent une topographie relativement accidentée où le roc et les matériaux d'origine glaciaire dominant. La vallée de la Chamouchouane qui sillonne cette région, ne présente pas la même allure tout au long de son parcours.

Entre l'emplacement de CH₂ et la rivière du Chef, la vallée est étroite et bordée de versants escarpés, d'une centaine de mètres de hauteur.

Ces derniers sont composés à 85% de leur longueur, de roc, de till et de matériaux fluvioglaciers grossiers. Le profil longitudinal moyen de la rivière, dans cette section, varie de 1,26 m/km à 2,05 m/km (fig. 4.4). Bien que l'écoulement y soit rapide, la composition grossière des matériaux a favorisé le développement de berges stables. L'activité des versants y est à peu près nulle.

Au nord de la confluence de la rivière du Chef et de la rivière Chamouchouane les vallées s'élargissent et les rebords deviennent de plus en plus confus. Le fond des vallées est plat et composé principalement de sédiments proglaciaires (sable) et fluvioglaciers (sable, gravier, cailloux). Situées dans ce secteur, les rivières du Chef et Nestacano ont un profil moyen variant de 46 cm/km à 57 cm/km. L'allure générale de ces cours d'eau correspond à un écoulement lent entrecoupé de petits rapides. Les berges sont composées surtout de sables, mais on note à certains endroits du gravier et des cailloux (Lupien, Rosenberg et Ass. Inc., 1979).

Au point de vue édaphique, soulignons seulement que le type de sols généralement rencontré dans cette région, appartient à l'ordre podzologique avec prédominance du grand-groupe humo-ferrique (S.A.G.E. Ltée, 1980).

4.2.1.2 Basses Terres argileuses

Cette région, sise au sud de CH₂, a l'allure d'une vaste plaine. Elle est composée de sable deltaïque ou fluvatile, reposant sur un silt

PROFIL EN LONG DE LA RIVIÈRE CHAMOUCOUANE

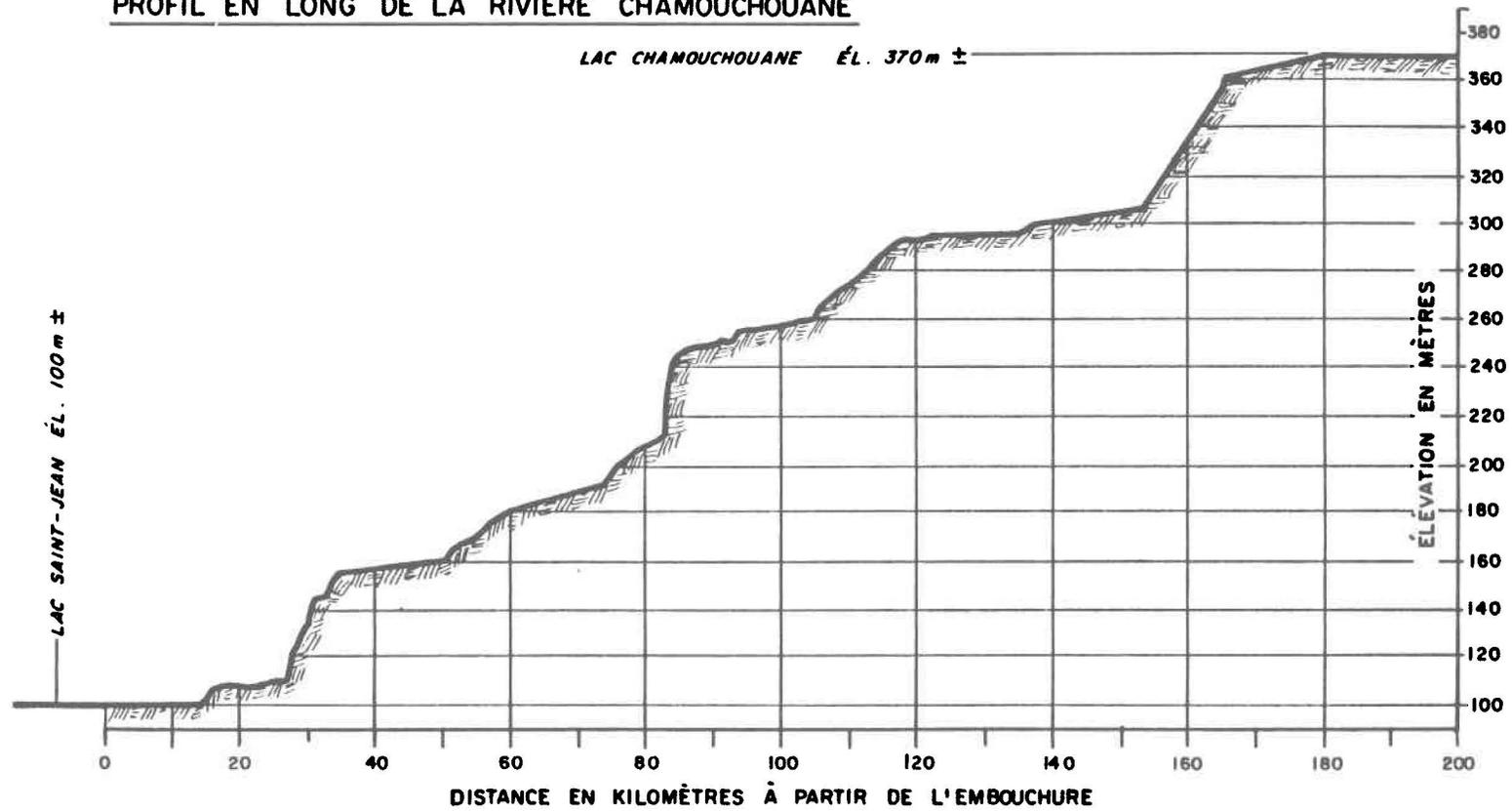


Figure 4.4: Profil en long de la rivière Chamouchouane

argileux d'origine marine. Les sols de cette région sont principalement utilisés par l'agriculture. Ils sont riches en éléments nutritifs, peu acides et bien structurés. Le profil longitudinal de cette section de rivière varie avec les saisons, de 1,6 cm/km à 40 cm/km. Au niveau des versants, on enregistre certaines activités tels des éboulements, coulées et glissements.

4.2.2 Conditions climatiques

De façon générale, le climat de ce secteur du Québec correspond au type continental humide. Plus spécifiquement, la zone drainée par la rivière Chamouchouane traverse deux régions climatiques distinctes: la première comprend l'ensemble du bassin de la Chamouchouane alors que la deuxième correspond à la cuvette du lac Saint-Jean, incluant l'embouchure de la rivière.

La première région, débute avec les premières basses collines du plateau Laurentien, et s'étend jusqu'aux limites nord du bassin versant. Elle est caractérisée par une saison végétative relativement courte (80 à 90 jours), et par une température moyenne de 16°C en juillet et de -20°C en janvier. La deuxième région, quant à elle, a une saison végétative beaucoup plus longue (100 à 125 jours). Ses températures moyennes sont aussi légèrement plus élevées: juillet +18°C et janvier -17°C. Pour l'ensemble des deux régions, il tombe annuellement entre 800 et 1100 mm de précipitation. Toutefois, la région des collines du plateau Laurentien reçoit annuellement plus de pluie et de neige que la région de la cuvette du lac Saint-Jean. Les vents dominants soufflent du nord-ouest (Roche ass., 1981).

4.2.3 Hydrologie

4.2.3.1 Profil en long

Tel que décrit précédemment, la rivière Chamouchouane présente une forte pente entre le kilomètre 27 et le lac Chamouchouane (kilomètre 176). La dénivellée est de 258 mètres, ce qui représente une pente moyenne de 1,7 m/km. Les premiers kilomètres à partir de l'embouchure sont, quant à eux, influencés par le niveau du lac Saint-Jean. La pente y est généralement faible (Roche et ass., 1981).

4.2.3.2 Débits

Située à la tête de la chute aux Saumons (chute à Michel), la station 061901 (voir figure 4.3) du réseau du ministère des Richesses naturelles, enregistre depuis 1953 les débits naturels de la rivière Chamouchouane. À l'aide de ces données l'Hydro-Québec a été en mesure de reconstituer les débits naturels de la rivière Chamouchouane pour une période s'étendant de 1913 à 1977. Ce travail complété, il fût possible d'établir les débits naturels de la rivière à différents endroits de son parcours.

Le tableau 4.6 donne les résultats détenus en terme de débits moyens mensuels. Le module représente la moyenne interannuelle des 12 mois. À l'embouchure de la rivière, la valeur du module est de 320,6 m³/s. Les débits les plus forts sont enregistrés au mois de mai, alors qu'à l'embou-

Tableau 4.6: Débits moyens mensuels à l'état naturel (m³/s) de la Rivière Chamouchouane

	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Module
Nestaocano à l'embou- chure	71,1	57,7	32,1	22,7	17,0	14,9	48,0	189,0	112,6	65,8	58,7	62,4	62,7
Du chef à l'embouchure	139,8	113,5	63,2	44,7	33,6	29,4	94,4	371,9	221,6	129,5	115,6	122,8	123,3
Chamouchouane à l'amont de la rivière du chef	126,5	102,7	57,2	40,5	30,4	26,6	85,4	336,4	200,5	117,2	104,6	111,1	111,6
CH ₄	275,7	223,8	124,6	88,2	66,1	57,9	186,1	733,1	436,9	255,4	227,9	242,1	243,2
CH ₃	322,9	262,2	146,0	103,3	77,5	67,8	218,0	858,9	511,9	299,2	267,0	283,6	284,9
CH ₂	339,2	275,5	153,4	108,5	81,4	71,3	229,0	902,2	537,7	314,3	280,4	298,0	299,2
CH ₁	345,0	280,2	156,0	110,3	82,8	72,5	232,9	917,6	546,8	319,6	285,2	303,0	304,3
Embouchure	363,5	295,2	164,3	116,3	87,2	76,4	245,4	966,7	576,1	336,8	300,5	319,3	320,6

Source: Hydro-Québec, Service hydraulique, décembre 1978. (Roche ass. 1981).

chure on note une valeur de 966,7 m³/s. Le mois de mars représente, quant à lui, le moment de l'année ou l'étiage est le plus sévère. La valeur du débit à l'embouchure est alors de 76,4 m³/s (Roche et ass., 1981).

4.2.3.3 Glaces

Entre la dernière semaine d'octobre et le milieu du mois de novembre, le couvert de glace se forme dans les zones à faible pente. À mesure que la température s'abaisse, le couvert progresse. Durant l'hiver, seul les rapides et les chutes sont libres de glaces. À ces endroits, des quantités impressionnantes de frazil sont formés. La débâcle se produit généralement vers le 30 avril dans la partie inférieure de la rivière, et vers le 5 mai dans la partie supérieure (Roche et Ass., 1981).

4.2.4 Qualité de l'eau

Les eaux de la rivière Chamouchouane sont caractéristiques du Bouclier Canadien. Elles sont peu minéralisées et peu productives. La couleur brune de ces eaux est attribuable à la présence de tannins et de lignines provenant de la décomposition du bois et des acides humiques et fulviques (tourbières). Dans la partie supérieure du bassin versant (Hautes Terres), la turbidité et les solides en suspension sont peu élevés contrairement à la partie inférieure (Basses Terres). Les nitrates, phosphates et sulfates sont présents à des concentrations très faibles. En ce qui concerne l'oxygène dissous, sa concentration approche toujours le niveau de satu-

ration tandis que la DBO et la DCO sont faibles. Pour ce qui est du régime thermique, il est décrit à la figure 4.5.

4.2.5 Faune aquatique

4.2.5.1 Plancton

À cause du peu d'éléments nutritifs que l'on retrouve dans les eaux du bassin de la rivière Chamouchouane, la productivité primaire y est réduite. La diversité zooplanctonique des eaux du bassin versant est typique des lacs oligotrophes du nord-est de l'Amérique du nord (tableau 4.7). Les densités de crustacés zooplanctoniques sont faibles, variant entre 3,000 et 4,000 organismes/m³.

4.2.5.2 Benthos

La faible minéralisation affecte aussi à la baisse les populations de benthos. En rivière, les espèces dominantes sont les larves d'insectes aquatiques tandis qu'en lacs ce sont les chironomidés et les oligochètes. En aval du site prévu pour le barrage CH₁, la rivière Chamouchouane n'offre pas un habitat propice à une faune benthique abondante et diversifiée contrairement à la zone amont. Ainsi en aval, seuls quelques pélécy-podes et chironomidés colonisent les substrats sablonneux. Dans la zone amont, on note la présence de coléoptères, de trichoptères et d'éphémères.

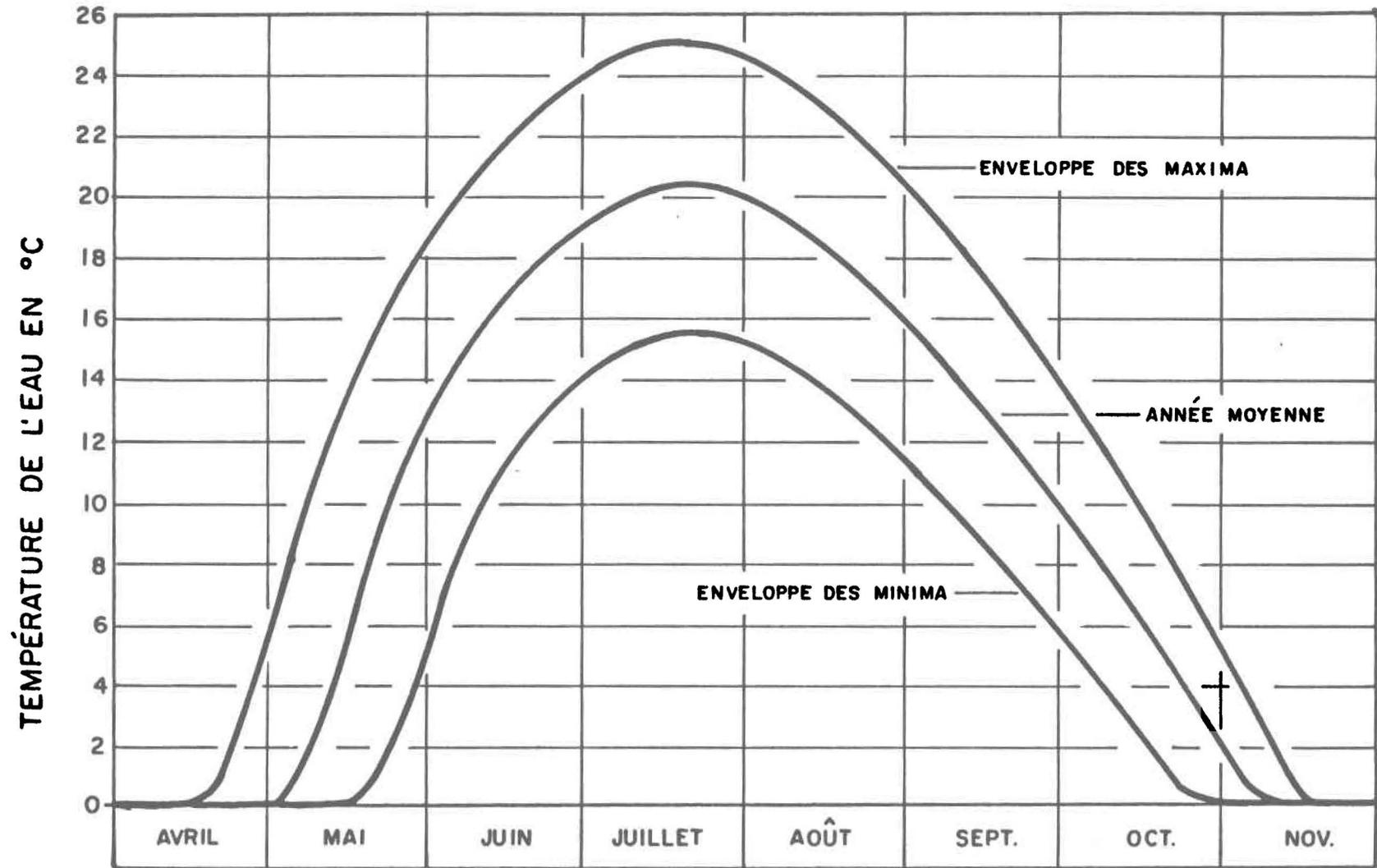


Figure 4.5: Variation de la température de l'eau de la rivière Chamouchouane en fonction du temps

Tableau 4.7: Principales espèces zooplanctoniques du bassin de la rivière Chamouchouane

<u>Rotifera</u>	CRUSTACEA	
	<u>Cladocera</u>	<u>Copepoda</u>
<u>Asplanchna priodonta</u>	<u>Bosmina longirostris</u>	<u>Diaptomus minutus</u>
<u>Conochilus unicornis</u>	<u>Daphnia catawba</u>	<u>Diaptomus spatulocrenatus</u>
<u>Kellicottia longispina</u>	<u>Daphnia galeata</u>	<u>Epischura lacustria</u>
<u>Keratella crassa</u>	<u>Daphnia longiremis</u>	<u>Mesocyclops edax</u>
<u>Synchaeta pectinata</u>	<u>Diaphanosoma leuchtenbergianum</u>	<u>Nauplius</u>
<u>Trichocerca cylindrica</u>	<u>Holopedium gibberum</u>	

Dans les lacs du bassin versant, la faune benthique est peu dense et peu diversifiée à cause entre autres de la faible quantité d'éléments nutritifs dans l'eau. Parmi les organismes rencontrés on retrouve des éphémères, des diptères, des mollusques et des nématodes.

4.2.5.3 Ichtyofaune

4.2.5.3.1 Peuplements piscicoles

Comme pour le plancton et le benthos, l'ichtyofaune du bassin versant de la rivière Chamouchouane est typique des eaux du Bouclier Canadien. On y dénombre plus de vingt-cinq espèces différentes de poissons. Le tableau 4.8 en donne la liste de même que la section du bassin versant où on les retrouve (exemple: CH₂ signifie le secteur du bassin versant qui sera occupé par le réservoir CH₂).

4.2.5.3.2 Ouananiche

Non seulement en raison de sa valeur récréative, touristique et économique mais également à cause de l'importance des populations, la ouananiche est l'une des richesses fauniques la plus importante de la région du lac Saint-Jean (Couillard, 1981). Ce dernier serait d'ailleurs le meilleur lac au monde pour la pêche à la ouananiche.

Tableau 4.8: Ichtyofaune du bassin de la rivière Chamouchouane et sections de rivière où on la retrouve

NOM LATIN	NOM FRANCAIS	CH ₁		CH ₂	CH ₃ +CH ₄	
		aval	amont		rivière	lacs
Salmonidae						
<u>Salmo salar</u>	Ouananiche	X	X	X		
<u>Salvelinus fontinalis</u>	Ombie de fontaine	X	X	X		X
<u>Salvelinus namaycush</u>	Touladi					X
<u>Coregonus artedii</u>	Cisco de lac					X
<u>Coregonus clupeaformis</u>	Grand corégone	X	X			X
Osmeridae						
<u>Osmerus mordax</u>	Eperlan arc-en-ciel	X				
Esocidae						
<u>Esox Lucius</u>	Grand brochet		X		X	X
Cyprinidae						
<u>Couesius plumbeus</u>	Méné de lac	X				
<u>Notropis cornutus</u>	Méné à nageoires rouges					
<u>Rhinichthys cataractae</u>	Naseux de rapides	X	X	X	X	
<u>Semotilus atromaculatus</u>	Mulet à cornes	X				
<u>Semotilus corporalis</u>	Ouitouche	X	X	X	X	X
<u>Semotilus margarita</u>	Mulet perlé					
Catostomidae						
<u>Catostomus catostomus</u>	Meunier rouge		X	X	X	X
<u>Catostomus commersoni</u>	Meunier noir		X		X	X
Ictaluridae						
<u>Ictalurus nebulosus</u>	Barbotte brune					
Gadidea						
<u>Lota Lota</u>	Lotte	X	X	X	X	
<u>Microgadus tomcod</u>	Poullamon atlantique	X				
Gasterosteidae						
<u>Culea inconstans</u>	Epinoche 5 épines	X				
<u>Gasterosteus aculeatus</u>	Epinoche 3 épines	X				
Percopsidae						
<u>Percopsis omiscomaycus</u>	Omisco					
Percidae						
<u>Perca flavescens</u>	Perchaude					X
<u>Stizostedion vitreum</u>	Doré	X	X	X		X
<u>Percina caprodes</u>	Dard-perche					
Cottidae						
<u>Cottus bairdi</u>	Chabot tacheté	X	X	X	X	

-----: Il n'existe pas de données concernant ces espèces.

La ouananiche (Salmo salar ouananiche) appartient à la même espèce que le saumon atlantique (Salmo salar salar). Les différences observées entre ces deux espèces tiennent uniquement des milieux respectifs dans lesquels ils vivent. L'ensemble du cycle vital de la ouananiche se passe en eau douce alors que le saumon atlantique partage son cycle vital entre l'eau douce et l'eau salée (Martel et Lesage, 1976).

Le cycle vital de la ouananiche se décrit ainsi: les géniteurs quittent le lac Saint-Jean pour remonter dans les tributaires où se fera la ponte et le développement des alevins et des tacons. Après deux ou trois années passées en rivière, les jeunes ouananiches redescendent vers le lac Saint-Jean où ils séjourneront pendant deux ou trois années. Cette période en lac leur permet d'atteindre leur maturité sexuelle et de prendre du poids (1 à 3 kg). Par la suite, les ouananiches retournent dans leur rivière natal pour la fraie et la boucle est ainsi fermée (Talbot et Desjardins, 1981).

L'importance de la rivière Chamouchouane dans le cycle vital de la ouananiche a été maintes fois démontrée (Martel et Lesage, 1976; Brouard et Talbot, 1979; Talbot et Desjardins, 1981). Ainsi, selon Martel et Lesage (non daté), la rivière Chamouchouane est responsable de 70 à 90% de la production annuelle de ouananiches du lac Saint-Jean. Cette rivière offre 52 milles d'accès aux géniteurs (jusqu'à la chute de la Chaudière) et ce, sans compter les petits tributaires de cette rivière (exemple: rivière aux Saumons, 16 milles accessibles). Elle est l'un des rares tributaires du lac

Saint-Jean a ne pas avoir subit de modification découlant de l'activité humaine (Couillard, 1982).

CHAPITRE 5

APPLICATION DU GRAPHE DE COHÉRENCE AU CAS ÉTUDIÉ

CHAPITRE 5

APPLICATION DU GRAPHE DE COHÉRENCE AU CAS ÉTUDIÉ

5.1 Identification et description des impacts

Considérant que le graphe de cohérence est une photo instantanée d'une action et de ses impacts, il a été nécessaire d'élaborer dans le cas présent, trois graphes de cohérence distincts afin de bien représenter la réalité. Ces trois graphes correspondent à trois actions qui se suivent dans le temps: la construction, la mise en eau et l'exploitation du complexe hydro-électrique de la rivière Chamouchouane. Il faut également noter que ces graphes font état uniquement des impacts du projet sur les organismes composant la faune aquatique de la rivière Chamouchouane. Cette restriction au niveau des composantes du milieu a été rendu nécessaire compte tenu de l'ampleur de la tâche en ce qui a trait à l'identification des impacts et du temps alloué pour ce travail. Il est évident que dans le cadre d'une véritable étude d'impact, seule une équipe multidisciplinaire disposant de suffisamment de temps pourrait venir à bout d'une telle tâche.

5.1.1 Phase de construction5.1.1.1 Bloc actions

La phase de construction des différents ouvrages composant le complexe hydro-électrique de la rivière Chamouchouane implique certaines

actions susceptibles d'engendrer des impacts sur la faune aquatique: les dérivations provisoires, la réalisation des ouvrages proprement dit, le nettoyage des zones inondées et les activités de chantier (figure 5.1).

a) Les dérivations provisoires

Les dérivations provisoires nécessitent la construction de batardeaux à l'aval et à l'amont des sites de construction. Composés d'un noyau de till et recouvert par un enrochement, ces batardeaux dévient la rivière vers des canaux habituellement excavés dans le roc. Ces dérivations permettent de mettre à sec les différents sites de construction.

b) La réalisation des ouvrages

Cette étape fait suite à la dérivation du cours d'eau et vise à édifier les différents ouvrages. Ces derniers comprennent les digues, les barrages, les évacuateurs de crues et les centrales de production d'électricité. Plusieurs opérations sont nécessaires à ce stade-ci telles que le décapage du sol et du fond de la rivière aux différents sites des barrages, le remblayage et le bétonnage.

c) Le nettoyage des zones inondées

Lors de la phase construction, on retrouve également l'étape de nettoyage des zones inondées. Cette intervention implique la coupe et l'é-

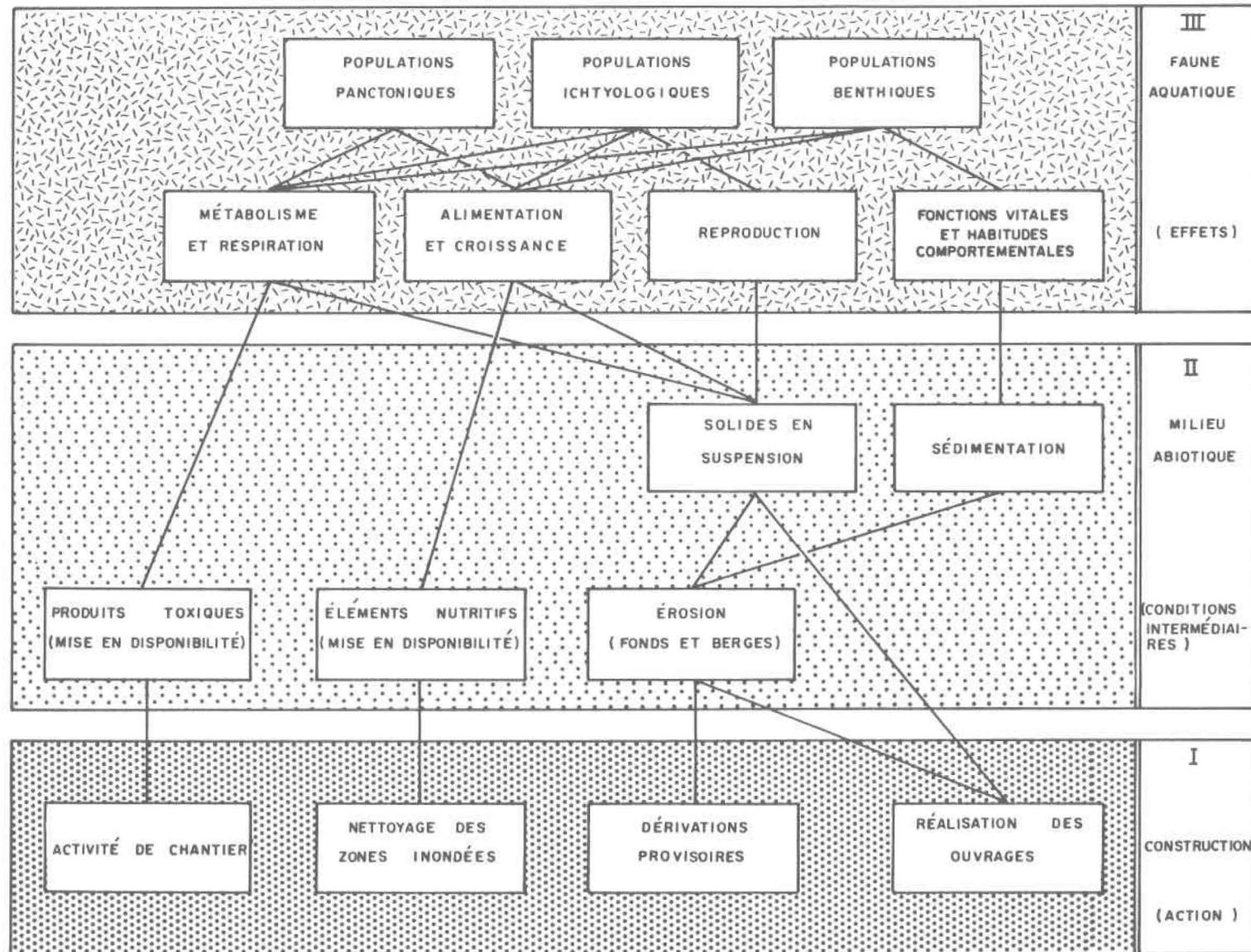


Figure 5.1: Graphe de cohérence des impacts sur la faune aquatique dus à la construction du complexe hydro-électrique de la rivière Chamouchouane.

limination de la végétation terrestre et riparienne situées dans les zones susceptibles d'être inondées après la mise en eau. Dans la région de la Chamouchouane, une grande partie du bois ainsi récupéré sera utilisé à des fins industrielles (pâtes et papiers, sciage...). Bien que cette opération se fasse généralement de façon mécanique, elle peut toute aussi bien être effectuée grâce à l'utilisation de moyens naturels (fluctuation des niveaux d'eau des réservoirs après la prise des glaces). Notons cependant que cette méthode fait encore l'objet d'études expérimentales (Gauthier, Poulin, Thériault Limitée, 1976).

d) Les activités de chantier

L'intense activité générée par un chantier de cette ampleur de même que la présence et l'utilisation de différentes substances entraînent des risques certains de dommages à l'environnement. En ce sens, ces activités doivent être considérées comme des facteurs potentiels de perturbation du milieu aquatique.

5.1.1.2 Bloc conditions intermédiaires: milieu abiotique

Les différentes actions associées à la phase construction entraînent, dans un premier temps, une perturbation du milieu abiotique. Ces perturbations composent le bloc conditions intermédiaires et seront décrites dans les prochains paragraphes.

a) Érosion (fonds et berges)

Le détournement de la rivière Chamouchouane à travers les galeries de dérivation aura pour effet d'augmenter le phénomène d'érosion dans la partie située immédiatement en aval des dites galeries. Ce phénomène d'érosion, attribuable à l'augmentation des vitesses de courant dans les canaux de dérivation, se fera sentir particulièrement au site de CH₁. Cet emplacement étant localisé dans la région des basses terres argileuses, les berges à cet endroit sont plus susceptibles à l'érosion que celles situées dans la région des hautes terres (CH₂, CH₃ et CH₄).

En ce qui a trait à la réalisation des ouvrages, le décapage du sol et du fond de la rivière de même que le nettoyage de la zone requise pour le bon fonctionnement du chantier pourront également entraîner une augmentation de l'érosion aux différents sites des travaux.

b) La mise en disponibilité de produits toxiques

Certaines activités de chantier peuvent entraîner la mise en disponibilité de substances toxiques susceptibles d'affecter la qualité des eaux de surfaces et souterraines (Armstrong, 1973). Ces substances peuvent être des hydrocarbures provenant de l'utilisation de machineries lourdes ou encore des acides ou autres produits utilisés lors de la construction des ouvrages.

c) La mise en disponibilité d'éléments nutritifs

L'enlèvement de la végétation terrestre et riparienne dans les futures zones d'inondation peut provoquer un accroissement de l'érosion du sol (Geen, 1974; Kerr, 1973). Au niveau de la qualité de l'eau, ce phénomène pourra entraîner une mise en disponibilité d'éléments nutritifs. Le secteur des basses terres argileuses (CH₁) est encore une fois susceptible d'être le plus touché à cause, entre autres, des sols riches en éléments nutritifs que l'on y retrouve et des versants qui présentent déjà une certaine activité.

d) Solides en suspension

Durant la phase de construction, une augmentation de la quantité de solides en suspension pourra être observée en aval des sites d'activités. Ces particules en suspension proviendront en grande partie du fond et des berges de la rivière qui subiront l'action érosive de l'eau provenant des galeries de dérivation. Armstrong (1973) identifie une autre source potentielle de solides en suspension associée aux rejets d'eaux usées provenant soit des opérations de bétonnage soit d'autres activités liées à la construction.

e) Sédimentation

Le phénomène d'érosion attribuable d'une part aux vitesses de courants à la sortie des dérivations provisoires et d'autre part aux activi-

tés liées à la réalisation des ouvrages, chargera l'eau de la rivière de particules en suspension qui iront sédimer dans des secteurs plus calmes en aval. Ce phénomène se produira principalement dans la zone des basses terres argileuses.

5.1.1.3 Bloc effets: faune aquatique

Les modifications du milieu abiotique engendrées par la construction du complexe hydro-électrique pourront entraîner des perturbations au niveau de la faune aquatique.

a) Métabolisme et respiration

Les fonctions vitales, telles le métabolisme et la respiration sont parmi celles qui risquent le plus d'être affectées à ce stade-ci. Les deux facteurs causaux impliqués sont la mise en disponibilité possible de substances toxiques et l'augmentation de solides en suspension. En rapport aux substances toxiques, et plus particulièrement aux hydrocarbures, Bury (1972) rapporte que des huiles en émulsion dans l'eau peuvent affecter les cellules épithéliales des poissons de même que leur respiration. Elles peuvent également causer la mort des organismes planctoniques et benthiques par simple contact. En ce qui concerne l'augmentation de la quantité de solides en suspension dans l'eau, Baxter et Glaude (1980) notent qu'à des concentrations élevées ces particules peuvent colmater les branchies des poissons et ainsi entraîner leur mort.

b) Alimentation et croissance

L'alimentation et la croissance des organismes aquatiques pourront également être perturbées soit par la mise en disponibilité d'éléments nutritifs, soit par l'augmentation de solides en suspension dans l'eau de la rivière, en aval des sites de construction. Ce dernier point est certainement le plus important à ce niveau. Ainsi, les macro-invertébrés benthiques auront tendance à quitter le secteur touché par cette perturbation soudaine de la qualité de l'eau et à se réfugier dans des secteurs moins affectés. Ceci aura pour effet de diminuer localement la nourriture disponible pour l'ichtyofaune (Baxter et Glaude, 1980). Bien que de moindre importance, la mise en disponibilité pourra favoriser la prolifération d'espèces planctoniques.

c) Reproduction

La reproduction de l'ichtyofaune est également susceptible d'être perturbée par le dépôt de fines particules provenant des sites de construction, sur les lits de gravier de frayères. À ce sujet, Baxter et Glaude (1980) indiquent que les oeufs et les alevins de certains salmonidés peuvent être endommagés sérieusement lorsque des dépôts de limon viennent empêcher la libre circulation de l'eau à travers le gravier. Ce phénomène sera probablement observable dans la zone des basses terres argileuses (CH₁).

d) fonctions vitales et habitudes comportementales

Certains autres impacts sur le milieu abiotique auront des répercussions sur l'ensemble des fonctions vitales et des habitudes comportementales des organismes vivants. Ainsi, dans les secteurs de la rivière où l'on enregistrera un phénomène de sédimentation assez intense, le milieu de vie des organismes benthiques sera passablement modifié. Chaque organisme sera affecté tant au niveau des fonctions vitales que de ses habitudes comportementales. Pour les organismes pouvant se déplacer, cela impliquera une migration vers des zones moins affectées. Pour les organismes benthiques sensibles, ces modifications du substrat pourront entraîner un accroissement du nombre de mortalité.

e) Populations de plancton

De façon générale, les populations planctoniques de la rivière Chamouchouane ne subiront pas de changements importants, tant au niveau de l'abondance que de la diversité. Ainsi, dans l'éventualité où le métabolisme de ces organismes serait affecté par un déversement de substances toxiques, leur abondance diminuera proportionnellement à l'importance du déversement et des populations touchées. En revanche, la mise en disponibilité d'éléments nutritifs affectera l'alimentation des populations planctoniques et provoquera une légère augmentation de l'abondance des organismes. Ce dernier changement sera surtout observable dans le secteur des basses terres argileuses.

f) Populations ichtyologiques

Les populations de poissons seront affectées à la baisse durant la phase de construction. Le déversement possible de substances toxiques de même que l'augmentation de solides en suspension agiront directement sur la respiration et la reproduction des espèces piscicoles. La ouananiche sera la plus touchée puisque sa reproduction sera menacée par le colmatage des frayères attribuable à la déposition de fines particules sur le gravier du lit de la rivière. Les populations ichtyologiques pourront également être affectées indirectement par le biais des mortalités d'espèces planctoniques et benthiques qui sont à la base de l'alimentation de plusieurs espèces de poissons.

g) Populations de benthos

Les populations d'organismes benthiques sont elles aussi susceptibles d'être affectées à la baisse à cette étape-ci du projet. Le principal facteur responsable de ce fait sera la modification du fond de la rivière attribuable à une augmentation de la sédimentation dans certains secteurs, qui entraînera une perturbation majeure du milieu de vie de ces populations. Le déversement possible de substances toxiques, de même que la perte de sources d'alimentation pourront également avoir un effet négatif sur ces organismes.

5.1.2 Phase mise en eau

5.1.2.1 Bloc actions

Les deux facteurs causaux qui caractérisent la phase de mise en eau sont les suivants: l'opération de mise en eau et la présence des barrages (figure 5.2).

a) Opération de mise en eau

L'opération de mise en eau consiste à rendre inopérant les ouvrages de dérivations et à modifier l'écoulement normal de la rivière, de manière à provoquer le remplissage des réservoirs en amont des barrages. La période de mise en eau des réservoirs est considérée comme terminée, lorsque le niveau d'eau de celui-ci atteint la cote d'opération. Le remplissage des quatre réservoirs du complexe de la rivière Chamouchouane se fera d'amont en aval et durera 24 mois (figure 5.3).

b) Présence des barrages

À partir du moment où les ouvrages de dérivations seront fermés, les quatre barrages situés sur la rivière Chamouchouane équivaldront à autant de barrières physiques sur celle-ci. La simple présence de ces ouvrages est un facteur causal non négligeable.

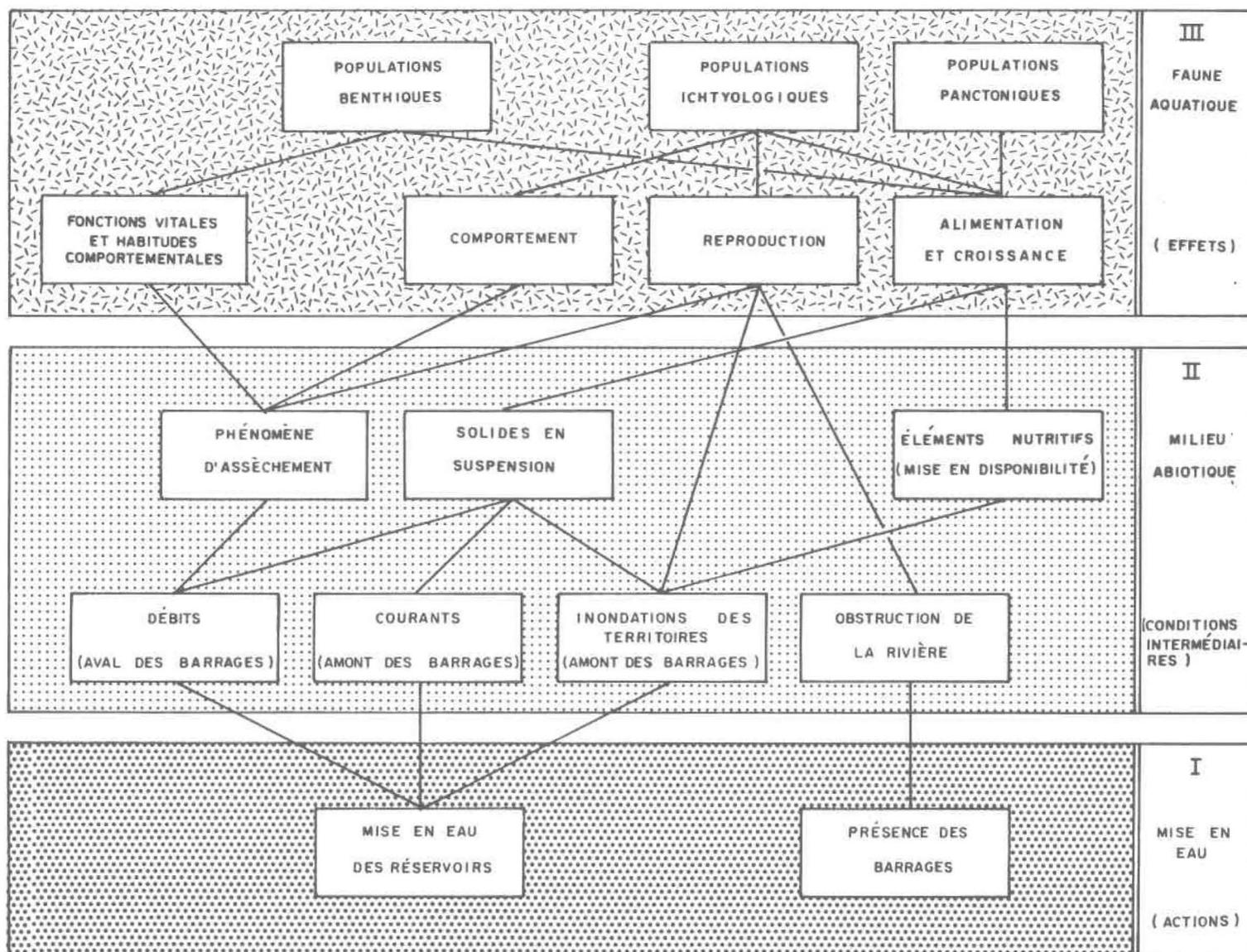


Figure 5.2: Graphe de cohérence des impacts sur la faune aquatique dus à la mise en eau du complexe hydro-électrique de la rivière Chamouchouane.

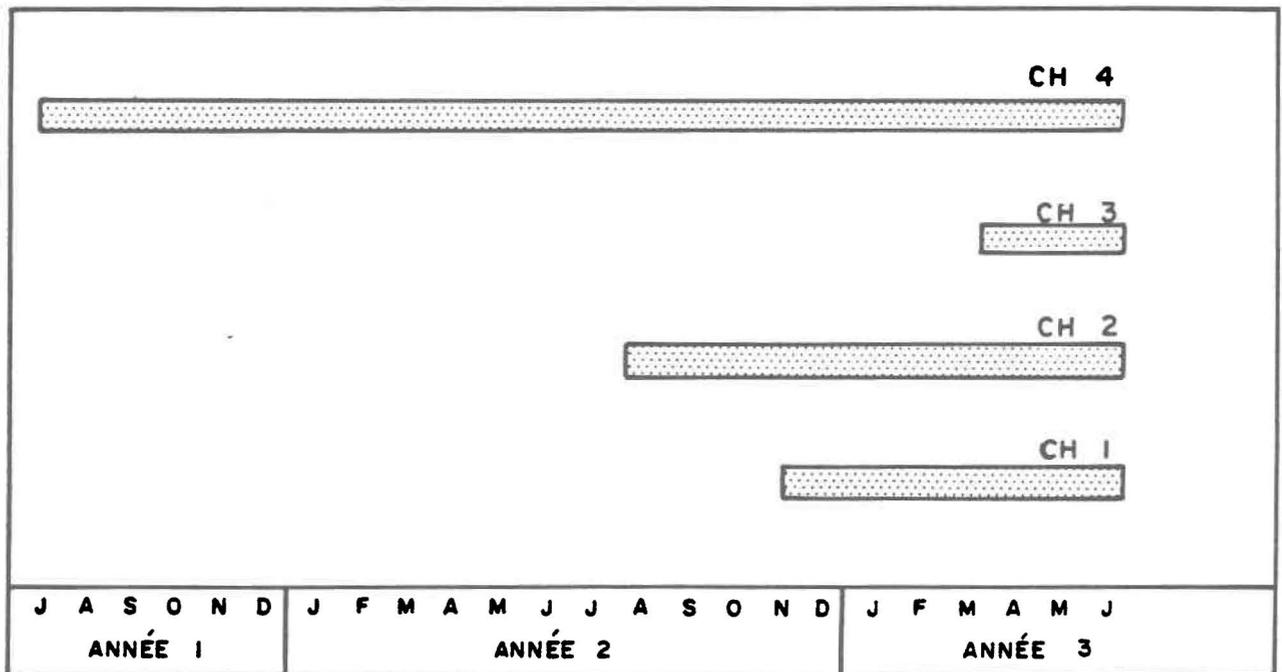


Figure 5.3: Calendrier du remplissage des réservoirs des complexes hydro-électriques de la rivière Chamouchouane

5.1.2.2 Bloc conditions intermédiaires: milieu abiotique

a) Débits en aval des barrages

La mise en eau d'un réservoir est généralement accompagné d'une élimination temporaire du débit en aval d'un barrage (Lagler, 1971). Le tableau 5.1 donne un aperçu des débits résiduels qui seront enregistrés lors du remplissage des réservoirs de la rivière Chamouchouane. Tel qu'indiqué précédemment, le remplissage du réservoir CH₄ nécessitera une coupure complète du débit en aval du barrage durant 24 mois. Pendant cette période, les débits résiduels en aval des barrages CH₃, CH₂ et CH₁ ne dépasseront jamais respectivement 15%, 19% et 20% (Roche ass., 1981).

b) Courant en amont des barrages

Les vitesses de courant risqueront également d'être fortement modifiées lors de la mise en eau des réservoirs. Ainsi, Geen (1974) précise que la création d'un réservoir change à la baisse et d'une façon dramatique les vitesses de courant dans les zones en amont des barrages. En fait l'ensemble de la rivière sera affecté puisque l'on passera graduellement d'un milieu lotique à un milieu lentique.

c) Inondation des territoires en amont des barrages

L'opération de mise en eau implique un rehaussement des niveaux d'eau en amont des différents barrages, dans le but de créer une réserve

Tableau 5.1: Débits résiduels lors du remplissage des réservoirs

Réservoir	Zone de CH ₃	Zone de CH ₂	Zone de CH ₁	Aval de CH ₁
CH ₄	amont: 0% aval : 15%	amont: 15% aval : 19%	amont: 19% aval : 20%	amont: 20% aval : 24%
CH ₃		amont: 0% aval : 5%	amont: 5% aval : 6%	amont: 6% aval : 11%
CH ₂			amont: 0% aval : 1.7%	amont: 1.7% aval : 6.7%
CH ₁				amont: 0% aval : 5%

d'eau utile. Dans le cas de la Chamouchouane, ce rehaussement entraînera l'inondation de 625 km² de territoires. La description de la composition des sols dans les secteurs touchés est fournie aux sections 4.2.1.1 et 4.2.1.2.

d) Obstruction de la rivière

À partir du moment où s'amorce la mise en eau des réservoirs, les ouvrages de retenues d'eau (barrages et digues) entrent en fonction. La présence de ces ouvrages crée, dès ce moment, une barrière physique sur la rivière (Ryder et Johnson, 1972).

e) Solides en suspension

Durant la phase de mise en eau d'un réservoir, on observe généralement une augmentation de la quantité de solides en suspension dans l'eau du réservoir (Duthie et Ostrofsky, 1975). Cette augmentation de solides en suspension est liée au phénomène d'érosion des territoires nouvellement inondés. Ce dernier point est particulièrement intense lorsque les zones inondées ont été préalablement débarrassées de la végétation qui les colonisait (Geen, 1974). Selon Geen (1975), 85 à 95% des matières qui se retrouvent ainsi en suspension resédimentent ailleurs dans le réservoir. La réduction des vitesses de courant à l'intérieur des réservoirs a sûrement un rôle à jouer à ce niveau. Cette augmentation de la sédimentation dans le réservoir a pour effet de laisser s'écouler une eau passablement claire en

aval du barrage. N'étant pas chargée de particules, cette eau a un pouvoir d'érosion beaucoup plus grand qu'une eau chargée, affectant ainsi d'une manière plus intense la zone aval du barrage (Bums et Chadwick, 1977). Dans la région de la Chamouchouane, c'est la zone située en aval du barrage de CH₂ (basses terres argileuses) qui sera le plus affectée par l'ensemble de ces phénomènes.

Un dernier point concerne la réduction des débits en aval du barrage de CH₁. Durant la période de mise en eau les faibles débits entre CH₁ et l'embouchure de la rivière Chamouchouane créeront une zone d'eau plus ou moins stagnante. L'activité des versants dans ce secteur entraîneront une mise en suspension de particules qui auront tendance à demeurer près des berges dans ce secteur.

f) Mise en disponibilité d'éléments nutritifs

Il est généralement admis que l'inondation de territoires, suite à la mise en eau de réservoirs, provoque un enrichissement de l'eau par un apport accru d'éléments nutritifs. Ces derniers proviennent soit du lessivage des sols inondés, soit de la décomposition des plantes submergées (Lagler, 1971; Baxter et Glaude, 1980). Dans le cas présent, la provenance d'éléments nutritifs se limitera au lessivage du sol du fait que les zones à inonder auront été préalablement débarrassée de toute végétation. De même, le secteur le plus touché sera une fois de plus la zone des basses terres argileuses (CH₁) bien qu'au niveau des hautes terres (CH₂, CH₃ et CH₄) le même phénomène se produise, mais avec une intensité moindre.

En rapport à la durée de la mise en disponibilité d'éléments nutritifs, Duthie et Ostrofsky (1975) indique que certaines études effectuées en U.R.S.S. tendent à démontrer qu'il existerait différentes étapes après le début de la mise en eau du réservoir. Ainsi, la première étape (durée: 5 à 6 ans) consisterait en une remise en circulation d'azote et de phosphore accompagnée d'une diminution d'oxygène dans le fond du réservoir. Si la région touchée par l'inondation compte la présence de tourbières, comme c'est le cas dans le secteur de la Chamouchouane, on observerait une augmentation de la concentration d'acide humique dans les eaux du réservoir. Par la suite la quantité d'éléments nutritifs diminuerait (durée: 13 ans) et approximativement 20 ans après le début de la mise en eau, la teneur en minéraux dans l'eau du réservoir augmenterait graduellement. Toujours selon le même auteur, certains réservoirs du complexe Churchill Falls (Labrador, Terre-Neuve) seraient actuellement à l'étape transitoire où la concentration d'éléments nutritifs diminue.

g) Phénomène d'assèchement

Un des derniers impacts sur le milieu abiotique a trait à la dessiccation des zones de rivière affectée par la diminution de débit durant la période de mise en eau des réservoirs. En aval des barrages et plus spécialement entre le barrage CH₁ et l'embouchure de la rivière Chamouchouane, certaines parties du fond de la rivière seront exposées à l'air libre durant toute la période de remplissage des réservoirs ce qui entraînera un assèchement de ces milieux.

5.1.2.3 Bloc effets: faune aquatique

a) Fonctions vitales et habitudes comportementales

L'assèchement des secteurs de rivière situés en aval des barrages provoquera une dégradation du fond de la rivière ce qui entraînera des conditions de vie défavorables aux organismes benthiques affectant ainsi les fonctions vitales et les habitudes comportementales de ces derniers. En plus de tuer un certain nombre d'organismes, cette perte de substrat réduira les zones disponibles au soutien des communautés benthiques.

b) Comportement

Le phénomène d'assèchement aura également un effet sur le comportement de l'ichtyofaune. En effet, les populations se répartiront dans les secteurs de la rivière non touchés ce qui impliquera une surpopulation à ces endroits et favorisera du même coup une augmentation de la prédation.

c) Reproduction

La reproduction de l'ichtyofaune est également sujette à subir certains contre-coups suite à la mise en eau des réservoirs. Ainsi, selon certains auteurs, un barrage hydro-électrique crée une barrière physique qui, en obstruant la rivière, peut causer la destruction pure et simple

d'une espèce migratrice (Lagler, 1971; Baxter et Glaude, 1980). Dans le cas de la rivière Chamouchouane, le barrage de CH₁ constituera une barrière infranchissable pour une espèce migratrice comme la ouananiche.

L'assèchement du cours d'eau peut également avoir des impacts importants sur la fraie de certaines espèces. Les ouananiches, par exemple, qui fraient dans les fosses situées en aval de CH₁ pourront être piégées à ces endroits lorsque l'opération de mise en eau débutera. De même, le faible débit durant cette période empêchera peut-être ou n'attirera pas la ouananiche à venir frayer dans le bassin versant de la Chamouchouane. La mise à l'air libre des oeufs pourra également avoir des effets néfastes sur les peuplements piscicoles.

L'inondation des territoires en amont des barrages est aussi un facteur susceptible d'engendrer des effets au niveau de la reproduction des poissons. Deux points en particulier retiennent l'attention. Dans un premier temps, la submersion de frayères sous plusieurs pieds d'eau peut entraîner un déclin au niveau de certaines populations de poissons emprisonnées dans les réservoirs, telles les saumons (ouananiche) (Ruggles et Watt, 1975). Dans un second temps, il peut y avoir augmentation rapide des peuplements piscicoles dans les nouveaux réservoirs, en partie à cause de l'augmentation du taux de reproduction. Cette augmentation est liée à l'existence de lieux de fraie et d'élevage sûrs créés par la végétation des zones inondées (Baxter et Glaude, 1980). Bien que des opérations de nettoyage des zones inondées se poursuivront durant l'étape de construction,

elles viseront presque exclusivement les arbres ayant une certaine valeur industrielle. Une partie de la végétation demeurera probablement dans les zones susceptibles d'inondation. En ce sens, ce dernier impact rapporté par Baxter et Glaude (1980) pourra s'appliquer au cas de la rivière Chamouchouane.

d) Alimentation et croissance

L'endiguement d'un cours d'eau pour former un bassin transforme un système lotique en un système lentique. Ce point, couplé à l'apport accru d'éléments nutritifs provenant des zones inondées, favorise le développement d'organismes planctoniques. Cette augmentation du plancton est suivie d'une hausse des populations à tous les niveaux trophiques y compris les organismes benthiques (Lagler, 1971; Baxter et Glaude, 1980).

Lors de la mise en eau du complexe Churchill Falls (Labrador, Terre-Neuve) Duthie (1975) et Ostrofsky (1975) ont observé que la biomasse de phytoplancton du lac Lobstick n'augmentait pas immédiatement. Au contraire, durant la période initiale et rapide de mise en eau, les populations avaient tendance à diminuer. D'après ces auteurs, ce fait serait attribuable en partie à l'augmentation de solides en suspension dans l'eau, qui réduisait ainsi la zone photique. Après cette période initiale, une diminution de solides en suspension aurait comme conséquence une augmentation des populations planctoniques.

Duthie (1975) a également observé que certaines espèces, qu'il appelle "particulate feeders", étaient avantagées lors de la mise en eau. Ainsi, dans le réservoir Osskomanuan du complexe Churchill Falls, les premières années de mise en eau auraient été favorables à des espèces telles Cyclops scutifer et Mesocyclops edax.

Dans la région de la Chamouchouane, on peut s'attendre à observer à peu près les mêmes scénarios. Cependant, l'inondation de tourbières présentes dans ce secteur pourrait, avec un apport accru d'acide humique dans l'eau des réservoirs, défavoriser les populations planctoniques. En terminant, l'augmentation de solides en suspension observée lors de la phase initiale de mise en eau pourrait avoir des effets néfastes sur les populations benthiques et ichtyologiques (Baxter et Glaude, 1980).

e) Populations de benthos

Les populations de benthos situées en aval de CH₁ seront à toutes fins pratiques détruites lors de l'assèchement de ce tronçon de rivière. L'importance de cette perte est toutefois mitigée du fait que déjà le milieu ne supporte pas une population très abondante. Pour ce qui est des populations en amont de CH₁ (dans les réservoirs), elles auront tendance à augmenter en raison de l'abondance de nourriture disponible. Cependant, le passage d'un milieu lotique à un milieu lentique désavantagera à long terme les populations benthiques. Ainsi, les larves d'insectes dites exigeantes, telles certaines espèces de trichoptères, feront place à d'autres espèces moins exigeantes (nématodes, mollusques...) (Roche ass., 1981).

f) Populations de plancton

Le passage d'un milieu lotique à un milieu lentique favorisera à coup sûr les populations planctoniques. La mise en disponibilité d'éléments nutritifs avantagera également le plancton. Durant la période initiale de mise en eau des réservoirs, certaines espèces telles Mesocyclops edax seront abondantes. Dès que la concentration de solides en suspension diminuera, ce sera au tour des populations de phytoplancton de prendre de l'expansion.

g) Populations ichtyologiques

Au niveau des populations de poissons situées en amont des barrages, certaines espèces tel le grand brochet, seront avantagées contrairement aux espèces comme les salmonidés, le tout étant lié entre autres aux facteurs de reproduction et d'alimentation (Beak Limitée, 1979).

La ouananiche sera sans nul doute l'espèce qui subira les plus grandes pertes à cette étape-ci. L'obstruction de la rivière par les barrages l'empêchera d'atteindre ses sites de fraies ce qui entraînera une diminution notable au niveau de son abondance. Plusieurs frayères seront également mise à l'air libre lors de la période d'assèchement de certains tronçons de rivière. L'augmentation de la prédation dans ces secteurs jouera également contre cette espèce.

5.1.3 Phase exploitation

5.1.3.1 Bloc actions

Les facteurs causaux associables à la phase exploitation se résument ainsi: le turbinage, l'opération des évacuateurs de crues, la présence des plans d'eau et celle des barrages (figure 5.4).

a) Turbinage

On entend par turbinage, l'action de faire passer une masse d'eau à travers une turbine dans le but de produire de l'électricité. L'eau provenant des réservoirs est amenée aux turbines par l'entremise d'une conduite forcée. La position de la prise d'eau associée à cette conduite varie d'un réservoir à l'autre. Dans le cas présent, les prises d'eau des barrages CH₂ et CH₃ seront situées au-dessus de la thermocline tandis que celle de CH₄ sera située au-dessous de la thermocline.

b) Opération des évacuateurs de crues

En ce qui a trait à l'opération des évacuateurs de crues, leur fonctionnement est principalement lié aux périodes de crues du printemps et de l'automne. Jouant le rôle de trop-plein, ces structures permettent de maintenir le niveau d'eau du réservoir à une cote dite maximale en empêchant l'eau de passer par dessus le barrage.

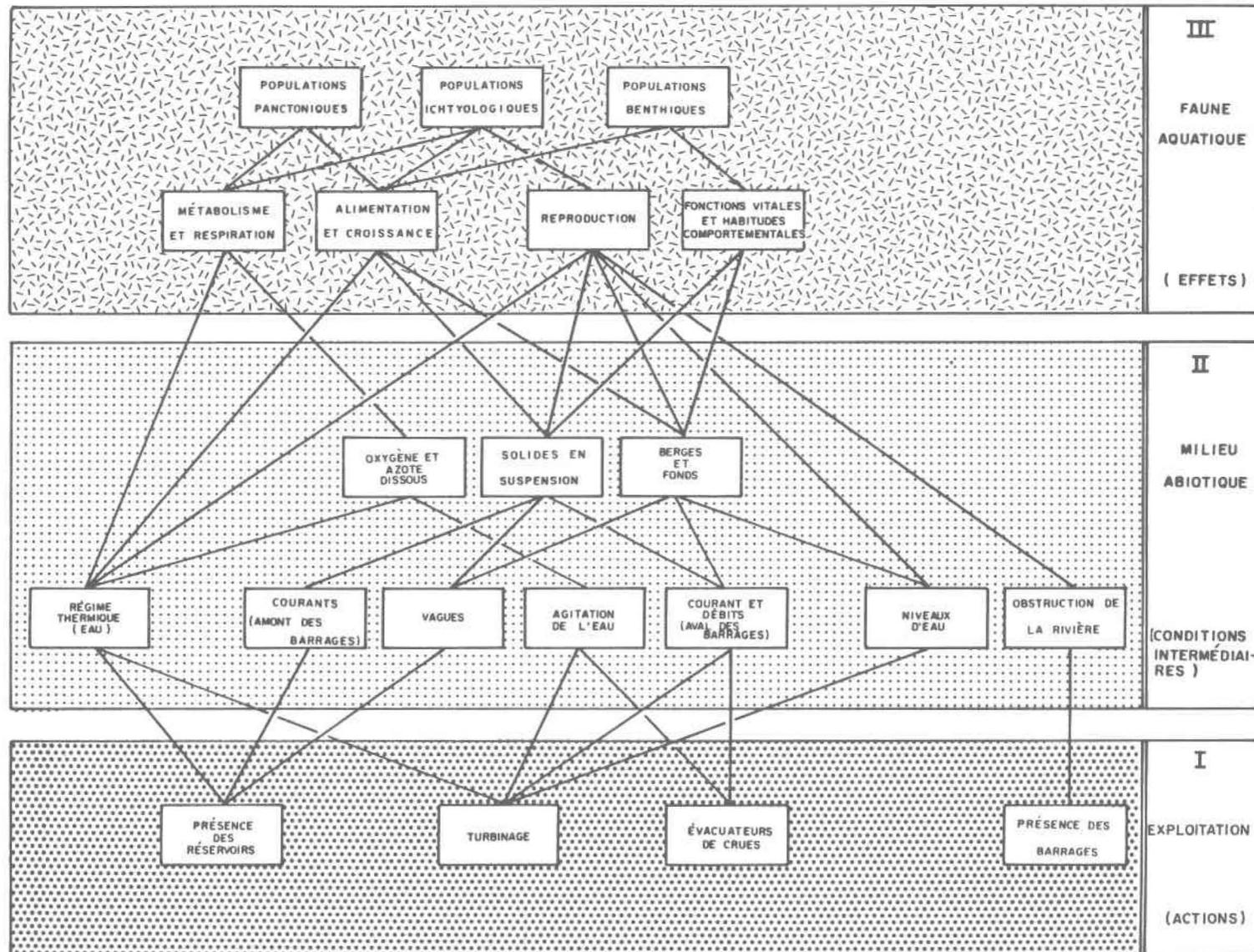


Figure 5.4: Graphe de cohérence des impacts sur la faune aquatique dus à l'exploitation du complexe hydro-électrique de la rivière Chamouchouane.

c) Présence des plans d'eau et des barrages

Les deux derniers facteurs causaux de la phase exploitation font référence à l'existence même des plans d'eau et des barrages. Les plans d'eau sont considérés en tant que masse et étendue d'eau tandis que les barrages sont associés à leur rôle premier de barrières physiques du cours d'eau.

5.1.3.2 Bloc conditions intermédiaires: milieu abiotique

a) Régime thermique de l'eau

Selon Leimkuhl (1972), la majorité des réservoirs que l'on retrouve dans les régions tempérées présentent une stratification thermique. Dans le cas présent, des quatre réservoirs qui composeront le complexe Chamouchouane, trois seront stratifiés (CH₂, CH₃, CH₄) tandis qu'un seul sera en isothermie à l'année (CH₁) (tableau 5.2). Le réservoir CH₄ aura ceci de particulier en ce sens qu'il sera stratifié à l'année longue avec une thermocline relativement profonde. Les différentes prises d'eau des conduites d'amener seront toutes au-dessus de la thermocline sauf dans le cas du réservoir CH₄ (Roche ass., 1981). En rapport à ce dernier point, Geen (1974) indique que le turbinage d'une eau provenant de l'hypolimnion peut entraîner en aval des températures d'eau plus basses en été et plus hautes à l'automne et à l'hiver (déphasage dans le temps). Étant donné que le réservoir CH₄ se trouvera en amont des trois, on peut supposer qu'il influencera les trois autres au niveau de la température de l'eau.

Tableau 5.2: Régime thermique et positionnement des prises d'eau des différents barrages du complexe de la Chamouchouane

		RÉSEROIRS			
		CH ₁	CH ₂	CH ₃	CH ₄
STRATIFIÉ			X	X	X
NON-STRATIFIÉ		X			
POSITIONNEMENT DES PRISES D'EAU	SOUS LA THERMOCLINE	1			X
	AU-DESSUS DE LA THERMOCLINE	1	X	X	

1 Ne s'applique pas

b) Courants en amont des barrages

La création d'un réservoir a pour effet de changer un milieu lotique (rivière) en un milieu lentique (lac). En ce sens, les vitesses de courant dans le secteur d'un réservoir ont tendance à diminuer de manière importante (Geen 1974; Geen 1975).

c) Vagues

L'apparition de grande étendue d'eau donne naissance au phénomène des vagues. La formation de celles-ci est gouvernée par trois facteurs: la force du vent, la durée de la période du vent et l'emprise qu'a le vent sur le réservoir (fetch) (Born et Stephenson, non daté).

d) Agitation de l'eau

L'exploitation d'un barrage hydro-électrique entraîne une augmentation locale de l'agitation de l'eau lors des opérations de turbinage et d'évacuation des crues.

e) Courants et débits en aval des barrages

La production d'électricité (turbinage) et l'opération des évacuateurs de crues impliquent des changements au niveau du volume et des variations saisonnières du débit. On observe généralement une augmentation des

débits minima et une diminution des inondations. Ceci revient à dire que les pics de crues et d'étiage sont ramenés, vers une moyenne (Lagler, 1971; Kerr, 1973; Geen 1974). La figure 5.5 fournie un aperçu de la différence entre les débits naturels et régularisés de la rivière Chamouchouane.

f) Niveaux d'eau

Les opérations de turbinage vont provoquer dans le réservoir de CH_4 , une importante variation du niveau de l'eau. Cette variation, ou marnage, affectera une superficie de plus de 246 km². En aval des barrages, la régularisation des débits va créer une certaine constance des niveaux d'eau. Des terrains qui étaient habituellement inondés lors des périodes de crues, ne le seront plus lorsque le complexe sera en exploitation.

g) Obstruction de la rivière

Tel que décrit lors de la phase de mise en eau, la présence des barrages crée une barrière physique sur la rivière (Ryder et Johnson, 1972). Cependant, l'obstruction de la rivière n'est pas complète en raison des opérations de turbinage qui permettent à l'eau de circuler d'amont en aval.

h) Oxygène dissous et autres gaz

Le phénomène d'agitation de l'eau associé aux opérations de turbinage et d'évacuation des crues sont responsables en partie de l'augmentation

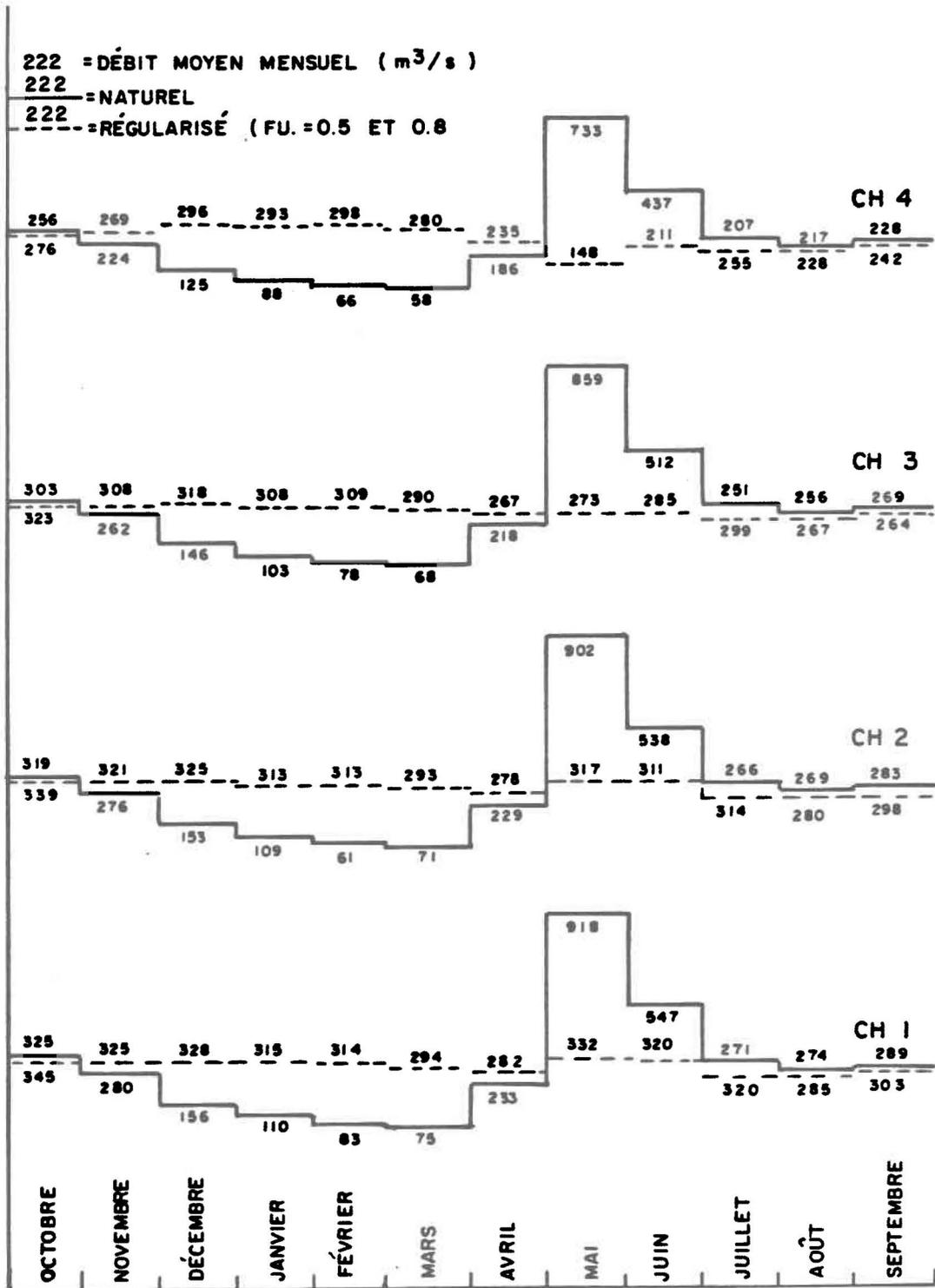


Figure 5.5: Comparaison entre les débits naturels et régularisés pour la rivière Chamouchouane

des concentrations d'oxygène et d'azote dissous observables en aval d'un barrage. En période de faible production énergétique, on doit injecter de l'air dans les turbines afin d'y réduire les pressions négatives. Grâce à l'agitation de l'eau dans la turbine, on observe à la sortie du canal de fuite une sursaturation de l'eau en oxygène et en azote (McDonald et Hyatt, 1973; Ruggles et Watt, 1975). Il en va de même lorsque l'eau passe par l'évacuateur de crues. À ce moment, les concentrations d'oxygène et d'azote dissous augmentent jusqu'à sursaturation. À la sortie de l'évacuateur, l'eau plonge en profondeur dans un bassin située en aval du barrage. Sous l'action des fortes pressions, l'oxygène et l'azote se trouvent à être piégée sous forme dissoute (Ackermann et al., 1973; Geen, 1974; Baxter et Glaude, 1980). Geen (1974) indique que cette sursaturation de l'eau par ces gaz peut être retrouvée à plusieurs milles du barrage en cause.

La stratification thermique des réservoirs peut également affecter la concentration d'oxygène dissous. Ainsi, dans la région de la Chamouchouane, la zone de l'hypolimnion pourra présenter une légère carence en oxygène durant les mois de stratification thermique. Cependant, Roche et ass. (1981) rapportent que plusieurs lacs du bassin versant de la Chamouchouane qui présentent à l'état naturel une stratification thermique, ont une eau qui est bien oxygénée en profondeur.

i) Solides en suspension

L'action érosive des vagues sur les berges des réservoirs pourra entraîner une mise en suspension de particules dans l'eau (Born et Stephenson, non daté). Ce phénomène sera surtout observable dans le réservoir CH₁, le tout en rapport à la nature même des berges. Les faibles vitesses de courant dans les réservoirs feront que 85 à 95% de ces solides en suspension resédimentent ailleurs dans le réservoir (Bums et Chadwick, 1977; Geen, 1975). Les sédiments provenant de l'ensemble du bassin versant par les différents tributaires de la Chamouchouane connaîtront le même sort. L'eau qui s'écoulera en aval sera plus claire et aura donc une action érosive plus grande (Graf, 1980). En aval de CH₁, ce dernier point entraînera une augmentation de l'érosion des berges. Les solides ainsi mis en suspension iront sédimer ailleurs dans la rivière. Il faut noter ici qu'au printemps, moment où les eaux sont le plus chargées en solides en suspension, la régularisation des débits empêchera la sédimentation de ces particules dans les zones d'inondation concentrant le tout au niveau de la rivière (Ryder et Johnson, 1972).

j) Berges et fonds

Les berges des réservoirs, particulièrement celles qui ont été débarrassées de la végétation, sont sujettes à l'érosion par les vagues et le marnage. Les fines particules sont ainsi entraînées dans l'eau et la berge devient rapidement une zone stérile composée de matériaux grossiers

(Geen, 1974). Le réservoir CH_1 sera particulièrement sensible à ce genre d'action.

En aval des barrages, Graf (1980) rapporte que des zones normalement inondées en période de crues, donc étant des sites de sédimentation potentiels, se sont retrouvées victimes d'érosion après que le cours d'eau ait été régularisé. D'après lui, le fait que l'eau qui s'écoule en aval des barrages soit non chargée, expliquerait en partie ce phénomène. La zone située en aval de CH_1 est toute désignée pour connaître pareille situation.

5.1.3.3 Bloc effets: faune aquatique

a) Métabolisme et respiration

Les changements au niveau du régime thermique de l'eau de même que la sursaturation en gaz dissous sont deux facteurs qui peuvent affecter le métabolisme des organismes aquatiques.

D'après Spence et Hynes (1971a, 1971b) les différences observées en aval et en amont d'un barrage, au niveau de l'ichtyofaune et du benthos, seraient attribuables à la modification du régime thermique de la rivière suite à son harnachement. D'après eux, un retard dans le réchauffement des eaux en aval d'un barrage, conséquence directe d'une prise d'eau située sous la thermocline, pourrait exclure les espèces d'eau chaude de ce secteur et les confinerait à l'amont du barrage. Dans le cas qui nous préoccupe, seul

Le barrage de CH₄ sera muni d'une prise d'eau sous la thermocline. Cependant, comme il a été dit précédemment, il est à prévoir qu'il existera un déphasage dans le temps en ce qui a trait aux variations de température de l'eau étant donné le positionnement du réservoir CH₄ et son influence possible sur les autres réservoirs en aval.

Une prise d'eau située dans l'épilimnion présente également des désavantages. Baxter et Glaude (1980) indique que cela peut avoir comme effet de provoquer un réchauffement excessif de l'eau en aval d'un barrage. En période chaude, ce secteur pourrait alors présenter certains problèmes d'oxygénation. Cela pourrait avoir des conséquences néfastes sur les organismes aquatiques.

La sursaturation de l'eau en gaz dissous est également un problème important. Un poisson qui est exposé à une eau sursaturée en azote et qui se retrouve ultérieurement dans une eau normale, peut voir l'azote passé à l'état gazeux dans son sang ce qui peut entraîner de multiples troubles (Geen, 1974; Baxter et Glaude, 1980). Westgard (1964) explique que les saumons peuvent devenir aveugles à la suite d'une exposition à une eau sursaturée en azote. Ces saumons deviennent plus susceptibles aux maladies et éprouvent beaucoup de problèmes lors de la reproduction. Plusieurs auteurs rapportent des cas de mortalités chez le saumon en rapport à ce phénomène (McDonald et Hyatt, 1973; Ruggles et Watt, 1975). Au niveau de la Chamouchouane, la ouananiche pourrait être grandement affectée si une telle situation se rencontrait.

b) Alimentation et croissance

Trois points peuvent affecter les facteurs d'alimentation et de croissance: le régime thermique, les solides en suspension et l'altération des berges. La modification du régime thermique en favorisant certaines espèces plutôt que d'autres, peut influencer des espèces de même niveaux trophiques ou de niveaux supérieurs. À titre d'exemple Baxter et Glaude (1980) rapporte qu'une variation de température, retardée par le harnachement d'une rivière, peut affecter négativement le développement de certaines larves d'insectes. Ces larves étant à la base de l'alimentation de plusieurs espèces de poissons, ceux-ci s'en trouvent par le fait même affectés. Dans le cas qui nous préoccupe, il est difficile de prévoir quelles seront les modifications que le nouveau régime thermique engendrera, étant donné l'énorme complexité des interactions.

En ce qui a trait aux solides en suspension, une diminution de leur quantité dans l'eau, reliée à une sédimentation accrue au niveau du réservoir, permettra une augmentation de la production primaire au détriment du benthos. Enfin, une modification des berges induite par l'action des vagues et du marnage à l'intérieur du réservoir pourra éliminer certaines espèces benthiques qui vivent au niveau de l'écotone ripicole et ainsi privé d'autres espèces de leur source de nourriture.

c) Reproduction

Plusieurs facteurs peuvent influencer la reproduction de l'ichtyofaune. Au départ, l'obstruction de la rivière par les barrages empêchera le déplacement d'espèces migratrices telle la ouananiche. L'accès aux frayères sera ainsi bloquée. Les jeunes ouananiches emprisonnées dans les réservoirs pourront cependant traverser les barrages par l'entremise des turbines. Cependant, selon Bentley et Raymond (1969) leur chance de survie est à peu près nulle.

Le marnage dans le réservoir CH₄ sera également nuisible à la reproduction des poissons. Ainsi, certaines espèces qui utilisent les zones d'eau peu profonde pour frayer, verront les oeufs et les alevins mis à sec si le régime d'exploitation prévoit une baisse du niveau d'eau pendant la période de reproduction de ces espèces (Geen, 1974; Baxter et Glaude, 1980). L'élimination des inondations pourra également avoir des effets sur certaines espèces, tel le brochet, en les privant de leurs zones de fraies (Lagler, 1971). Les vagues peuvent également altérer le fond du littoral à l'intérieur du réservoir et détruire ainsi plusieurs frayères.

Le déphasage des variations de température peut quant à lui accélérer ou ralentir le cycle de reproduction de plusieurs espèces. Selon Geen (1974), le saumon est particulièrement sensible à ce genre de situation. Finalement, la déposition de particules sur les frayères peut rendre leur utilisation impossible pour certaines espèces. Encore une fois, les salmonidés sont particulièrement désavantagés.

d) Fonctions vitales et habitudes comportementales

Dans les réservoirs, l'augmentation de la sédimentation va provoquer une détérioration du substrat comme support pour la population benthique. Les conditions de vie difficiles qui prévaudront à ces endroits affecteront les fonctions vitales de même que les habitudes comportementales des organismes touchés. Cependant, en aval, la régularisation du débit assurera un substrat stable qui favorisera la faune benthique (Lagler, 1971; Baxte et Glaude, 1980).

e) Populations de plancton

Les populations de plancton seront nettement avantagées. Elles devraient dépasser en abondance et en diversité le niveau actuel (état naturel de la rivière Chamouchouane). Cependant étant donné que les eaux des réservoirs CH₁ et CH₂ seront plus turbides, les populations de plancton y seront moins abondantes que dans les réservoirs CH₃ et CH₄.

f) Populations de benthos

Sauf en aval du barrage CH₁, les populations seront passablement réduites. Le marnage, la sédimentation et les modifications au régime thermique sont autant de facteurs défavorables à l'établissement d'une population benthique abondante dans les réservoirs.

g) Populations ichtyologiques

La principale ressource ichtyologique de la région, la ouananiche, sera particulièrement affectée à cette étape-ci. Certains facteurs tels l'obstruction de la rivière, l'élimination de sources de nourriture (larves d'insectes...) et de sites de fraies adéquats de même que la sursaturation de l'eau en azote dissous entraîneront une importante diminution de la population de ouananiches du lac Saint-Jean. Selon une étude effectuée par Beak Limitée (1979), les réservoirs CH₂ et CH₃ posséderont certaines caractéristiques favorables à l'établissement de populations de ouananiches dans ces réservoirs. Cependant, il ne faudra pas s'attendre à compenser la perte de ouananiches du lac Saint-Jean par ces petites populations.

En ce qui a trait aux autres espèces ichtyologiques, le grand corégone, le grand brochet et le doré seront les plus susceptibles d'être rencontrés dans les réservoirs. Secondairement, la perchaude, le cisco de lac, les meuniers rouge et noir et plusieurs espèces de cyprinidés pourront composer les populations de poisson de ces réservoirs. Une particularité est à noter au niveau de CH₄: la présence de marnage favorisera les espèces indépendantes du littoral (grand corégone et touladi).

5.2 Interprétation mathématique des graphes de cohérence

Dans un but complémentaire, une interprétation des trois graphes de cohérence précédemment présentés sera tentée (voir figures 5.1, 5.2, 5.4).

Comme il a été mentionné dans le chapitre 3, la méthode de la dynamique polyédrale ne peut être utilisée directement que pour des graphes à deux niveaux. Puisque les trois graphes de cohérence à interpréter ont cinq niveaux, l'utilisation de la dynamique polyédrale sera donc abandonnée. Quant à son adaptation pour les graphes de cohérence à n-niveaux reliés, elle ne pourra être retenue puisque les trois graphes à étudier n'ont pas cette caractéristique. En effet, dans chacun des graphes on retrouve des liens d'un niveau inférieur à un niveau supérieur non nécessairement immédiat. Par exemple, à la figure 5.1, l'action "réalisation des ouvrages" entraîne comme effet une érosion dont la case se situe au niveau deux en plus d'une remise en suspension des solides retrouvés au niveau trois. Enfin, la seule technique applicable demeure donc la mesure d'importance, celle-ci ayant été créée pour toute catégorie de graphe de cohérence. Il n'en demeure pas moins que la possibilité d'utilisation des autres méthodes aurait été avantageuse car elles auraient ajoutées des éléments d'information à l'interprétation.

5.2.1 Représentation vectorielle des trois graphes

Afin de faciliter l'écriture, chacun des paramètres sera représenté par les majuscules X_i pour la phase "Construction", Y_j pour la phase "Mise en eau" et Z_k pour la phase "Exploitation". Nous obtiendrons ainsi les représentations suivantes:

Phase "Construction" (graphe I) (figure 5.6)

- X_1 : Activités de chantier
- X_2 : Nettoyage des zones inondées
- X_3 : Dérivations provisoires
- X_4 : Réalisation des ouvrages
- X_5 : Produits toxiques (mise en disponibilité)
- X_6 : Éléments nutritifs (mise en disponibilité)
- X_7 : Érosion (fonds et berges)
- X_8 : Solides en suspension
- X_9 : Sédimentation
- X_{10} : Métabolisme et respiration
- X_{11} : Alimentation et croissance
- X_{12} : Reproduction
- X_{13} : Fonctions vitales et habitudes comportementales
- X_{14} : Populations planctoniques
- X_{15} : Populations ichthyologiques
- X_{16} : Populations benthiques

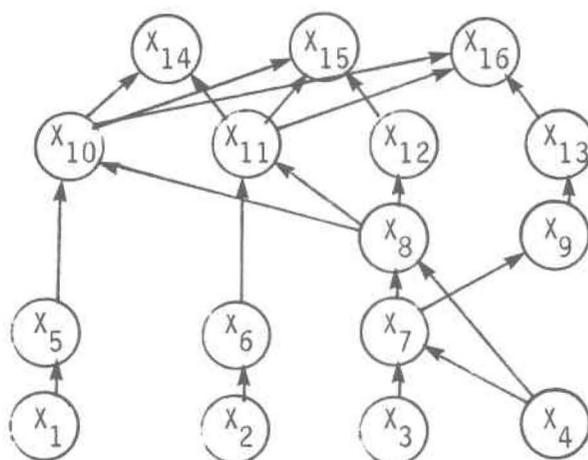


Fig. 5.6: Graphe représentant la phase "Construction d'un barrage".

Phase "Mise en eau" (graphe II) (figure 5.7)

- Y₁ : Mise en eau des réservoirs
- Y₂ : Présence des barrages
- Y₃ : Débits (en aval des barrages)
- Y₄ : Courants (en amont des barrages)
- Y₅ : Inondations des territoires (en amont des barrages)
- Y₆ : Obstruction de la rivière
- Y₇ : Phénomène d'assèchement
- Y₈ : Solides en suspension
- Y₉ : Éléments nutritifs (mise en disponibilité)
- Y₁₀ : Substrat
- Y₁₁ : Comportement
- Y₁₂ : Fonctions vitales et habitudes comportementales
- Y₁₃ : Alimentation et croissance
- Y₁₄ : Populations benthiques
- Y₁₅ : Populations ichthyologiques
- Y₁₆ : Populations planctoniques

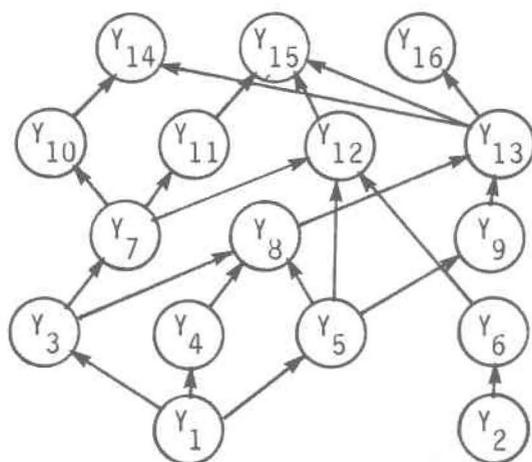


Fig. 5.7: Graphe représentant la phase "Mise en eau d'un barrage"

Phase "Exploitation" (graphe III) (figure 5.8)

- Z₁ : Présence des réservoirs
- Z₂ : Turbinage
- Z₃ : Évacuateurs de crues
- Z₄ : Présence des barrages
- Z₅ : Régime thermique (eau)
- Z₆ : Courants (amonts des barrages)
- Z₇ : Vagues
- Z₈ : Agitation de l'eau
- Z₉ : Courants et débits (aval des barrages)
- Z₁₀ : Niveaux d'eau
- Z₁₁ : Obstruction de la rivière
- Z₁₂ : Oxygène et azote dissous
- Z₁₃ : Solides en suspension
- Z₁₄ : Berges et fonds
- Z₁₅ : Métabolisme et respiration
- Z₁₆ : Alimentation et croissance
- Z₁₇ : Reproduction
- Z₁₈ : Fonctions vitales et habitudes comportementales
- Z₁₉ : Populations planctoniques
- Z₂₀ : Populations ichthyologiques
- Z₂₁ : Populations benthiques

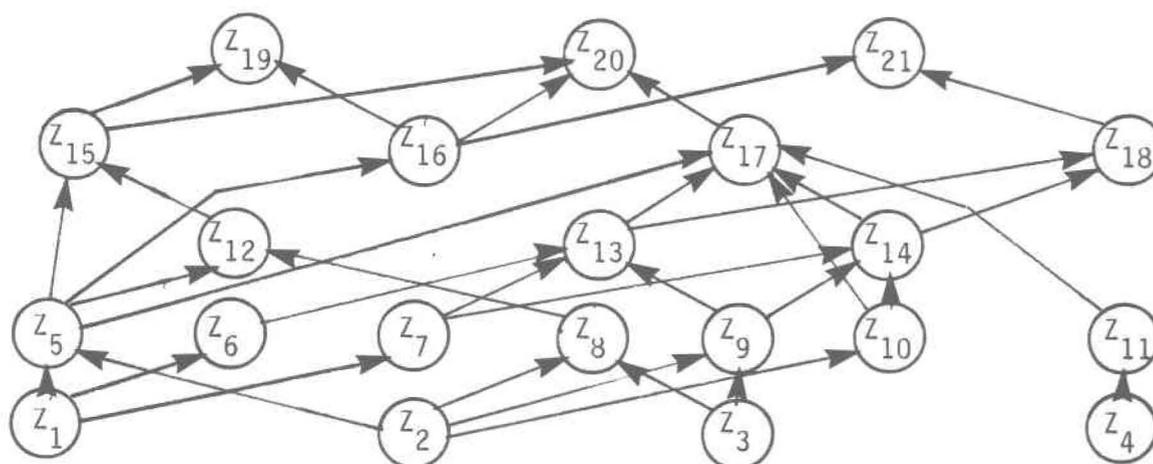


Fig. 5.8: Graphe représentant la phase "Exploitation d'un barrage".

L'ensemble des causes et des effets de ces graphes est considéré homogène en ce sens que les actions posées ont des effets sur l'environnement. Lorsqu'on parle d'effets perturbant l'environnement, on les qualifie de négatifs tout en étant de valeur variable. On peut donc traiter en entier, chaque graphe, pour le calcul des mesures d'importance.

5.2.2 Calcul des mesures d'importance

5.2.2.1 Mesure d'importance $m(x_j)$

Afin de faciliter les calculs, il est préférable de faire la matrice associée à chacun des graphes étudiés, où X_1 à X_{13} pour le graphe I, Y_1 à Y_{13} pour le graphe II et Z_1 à Z_{18} pour le graphe III, sont en ordonnée, classifiés comme causes. Les X_5 à X_{16} pour le graphe I, Y_3 à Y_{16} pour le graphe II et Z_5 à Z_{21} pour le graphe III, sont en abscisse, représentant les effets (tableaux 5.3 à 5.5).

Pour chacune des causes, on calcule la mesure d'importance

$$m(x_j) = \sum_i \frac{1}{d^-(x_i)}$$

où: x_i = effets touchés par la cause x_j , $i \neq j$

$d^-(x_i)$ = degré intérieur de x_i , c'est-à-dire le nombre d'arcs qui arrivent à l'effet x_i .

La colonne 1 des tableaux 5.3, 5.4 et 5.5, présente les résultats.

5.2.2.2 Mesure d'importance totale $M(x_j)$

Pour tenir compte de l'ensemble du graphe, la mesure d'importance totale est définie ainsi:

$$M(x_j) = m(x_j) + \sum_p m(x_p)$$

où: x_p = tous les effets directs et indirects atteints par x_j .

Le calcul de $M(x_j)$ à partir des causes situées sur l'avant-dernier niveau, permet d'utiliser la formule ainsi transformée:

$$M(x_j) = m(x_j) + \sum_q M(x_q)$$

où: x_q = tous les effets directs (seulement), atteints par x_j .

Pour les trois (3) graphes, les différentes étapes sont les suivantes:

- 1) Le calcul de $M(x_j)$ pour les causes terminales (X_{10} à X_{13} pour le graphe I, Y_{10} à Y_{13} pour le graphe II et Z_{15} à Z_{18} pour le graphe III) correspond uniquement à la valeur de $m(x_j)$.
- 2) Le calcul de $M(x_j)$ pour les causes situées sur le troisième niveau (X_8 et X_9 pour le graphe I, Y_7 à Y_9 pour le graphe II et Z_{12} à Z_{14} pour le graphe III) correspond à la valeur de $m(x_j)$ de la cause considérée, additionnée au $M(x_q)$ de chacun des effets touchés directement. Par

$$\begin{aligned}
 \text{exemple, pour le graphe I, } M(X_8) &= m(X_8) + M(X_{10}) + M(X_{11}) + M(X_{12}) \\
 &= 2,00 + 1,17 + 1,17 + 0,33 \\
 &= 4,67
 \end{aligned}$$

où $M(X_{10})$, $M(X_{11})$ et $M(X_{12})$ ont été calculées à l'étape 1.

- 3) Pour les causes situées sur le deuxième niveau (X_5 à X_7 pour le graphe I, Y_3 à Y_6 pour le graphe II et Z_5 à Z_{11} pour le graphe III), le calcul de $M(x_j)$ se fait de la même façon qu'en 2. Par exemple, pour le graphe

$$\begin{aligned}
 \text{I, } M(X_7) &= m(X_7) + M(X_8) + M(X_9) \\
 &= 1,50 + 4,67 + 1,33 \\
 &= 7,50
 \end{aligned}$$

où $M(X_8)$ et $M(X_9)$ ont été calculées à l'étape 2.

- 4) Et enfin, pour les causes initiales, nous avons le même processus qu'en

$$\begin{aligned}
 \text{2. Par exemple, pour le graphe I, } M(X_4) &= m(X_4) + M(X_7) + M(X_8) \\
 &= 1,00 + 7,50 + 4,67 \\
 &= 13,17
 \end{aligned}$$

où $M(X_7)$ a été calculé à l'étape 3 et $M(X_8)$ à l'étape 2.

Nous obtenons ainsi, la colonne $M(x_j)$ des tableaux 5.3, 5.4 et 5.5.

5.2.3 Interprétation

Comme l'homme intervient directement au niveau 1, on ne considère dans l'interprétation, que les mesures d'importance totale des X_i , Y_j et Z_k classifiés uniquement comme causes, c'est-à-dire les actions du niveau 1.

Dans le graphe I, à partir des calculs on voit que l'élément "réalisation des ouvrages" (X_4), avec une valeur de $M(x_j) = 13,17$, représente l'action qui est nettement la plus importante. Il faut se rappeler qu'ici, la notion d'importance ne tient pas compte de la valeur de l'impact, mais plutôt du nombre d'impacts entraînés. L'élément "les dérivations provisoires" (X_3) arrive en second rang avec une valeur de 8,00 comme mesure d'importance totale. Tandis que les éléments "activités de chantier" (X_1) et le "nettoyage de la zone inondée" (X_2) se retrouvent au dernier rang avec des résultats identiques, soit 2,67.

Pour la phase "Mise en eau d'un barrage" (graphe II), la mesure d'importance totale pour l'élément "mise en eau des réservoirs" (Y_1) est de beaucoup supérieure à celle de l'élément "présence des barrages" (Y_2), avec 19,50 comparativement à 1,67.

Quant au graphe III, soit la phase "Exploitation, d'un barrage" l'élément "turbinage" (Z_2) obtient le résultat maximum pour la mesure d'importance totale, avec 20,83, mais suivi de près par l'élément "présence des réservoirs" (Z_1), avec 18,46. L'élément "évacuateurs de crues" (Z_3) arrive, quant à son importance totale, en troisième lieu avec 9,90. De même, dans ce graphe-ci, l'élément "présence des barrages" (Z_4) semble avoir peu d'importance.

Suite à ces observations, on serait tenté de comparer les résultats d'un graphe à l'autre. Mais une telle comparaison n'aurait pas de valeur. Pour pouvoir comparer toutes les actions les unes aux autres, il faudrait regrouper les trois (3) graphes en un seul et recommencer les calculs. Les valeurs ainsi recalculées, seraient, pour la plupart des causes, changées, et pas nécessairement de façon proportionnelle. En effet, certains paramètres sont retrouvés d'un graphe à l'autre, pouvant faire varier le degré intérieur de certains effets directs. Par le fait même, les résultats pourraient différer, le degré intérieur étant la base du calcul.

Malgré la brève idée du type d'interprétation qu'on peut faire à l'aide de la mesure d'importance, on voit clairement que la pondération des liens, même si imprécise qu'elle puisse être, combinée à cette technique de calcul, serait très avantageuse.

De plus cette méthode utilisée par un groupe multidisciplinaire serait de valeur supérieure car des connaissances variées permettraient un approfondissement du sujet en question, donc une interprétation plus complète et une meilleure compréhension.

x_j CAUSES	EFFETS x_i												1	2
	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	$m(x_j)$	$M(x_j)$
x_1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,00	2,67
x_2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,00	2,67
x_3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,50	8,00
x_4	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1,00	13,17
x_5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,50	1,67
x_6	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0,50	1,67
x_7	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1,50	7,50
x_8	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	2,00	4,67
x_9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1,00	1,33
x_{10}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1,17	1,17
x_{11}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1,17	1,17
x_{12}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0,33	0,33
x_{13}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,33	0,33
$d^-(x_j)$	1	1	2	2	1	2	2	1	1	2	3	3	-	-

Tableau 5.3: Matrice associée au graphe de cohérence, représentant la phase construction (graphe I). Degré intérieur $[d^-(x_j)]$, mesure d'importance $[m(x_j)]$ et mesure d'importance totale $[M(x_j)]$.

x_j CAUSES	EFFETS x_i															1	2
	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9	Y_{10}	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}	Y_{14}	Y_{15}	Y_{16}	$m(x_j)$	$M(x_j)$	
Y_1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,00	19,50	
Y_2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,00	1,67	
Y_3	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1,33	7,17	
Y_4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,33	2,67	
Y_5	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1,67	6,67	
Y_6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0,33	0,67	
Y_7	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	2,33	3,50	
Y_8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0,50	2,33	
Y_9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0,50	2,33	
Y_{10}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0,50	0,50	
Y_{11}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0,33	0,33	
Y_{12}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0,33	0,33	
Y_{13}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1,83	1,83	
$d^-(x_j)$	1	1	1	1	1	3	1	1	1	3	2	2	3	1	-		

Tableau 5.4: Matrice associée au graphe de cohérence, représentant la phase mise en eau (graphe II). Degré intérieur $[d^-(x_j)]$, mesure d'importance $[m(x_j)]$ et mesure d'importance totale $[M(x_j)]$.

EFFETS x_j CAUSES	x_i																		1	2
	Z_5	Z_6	Z_7	Z_8	Z_9	Z_{10}	Z_{11}	Z_{12}	Z_{13}	Z_{14}	Z_{15}	Z_{16}	Z_{17}	Z_{18}	Z_{19}	Z_{20}	Z_{21}	$m(x_j)$	$M(x_j)$	
Z_1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,50	18,46	
Z_2	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,50	20,83	
Z_3	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,00	9,90	
Z_4	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,00	1,53	
Z_5	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,53	5,37	
Z_6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,33	3,53	
Z_7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0,67	7,07	
Z_8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,50	1,83	
Z_9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0,67	7,07	
Z_{10}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0,53	4,07	
Z_{11}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0,20	0,53	
Z_{12}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,50	1,33	
Z_{13}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1,03	3,20	
Z_{14}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1,03	3,20	
Z_{15}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0,83	0,83	
Z_{16}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1,33	1,33	
Z_{17}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0,33	0,33	
Z_{18}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,50	0,50	
$d^-(x_i)$	2	1	1	2	2	1	1	2	3	3	2	3	5	2	2	3	2	-	-	

Tableau 5.5: Matrice associée au graphe de cohérence, représentant la phase exploitation (graphe III). Degré intérieur $[d^-(x_i)]$, mesure d'importance $[m(x_j)]$ et mesure d'importance totale $[M(x_j)]$.

CONCLUSIONS¹ ET RECOMMANDATIONS²

- C1 Tel que développé actuellement, la méthode du graphe de cohérence est plus un "outil descriptif d'impact" qu'une méthode d'évaluation d'impact.
- C2 Le problème rencontré lors de l'application simultanée des règles de cohérence et d'indépendance des éléments (cases) d'un même niveau a été solutionné par l'ajout d'un nouvel élément structurel appelé "bloc". L'indépendance des éléments (cases) d'un même niveau a été conservé tandis que la notion de cohérence a été reportée au niveau du bloc. Ce dernier point permet ainsi d'établir des interrelations entre des éléments cohérents, ce qui était à toutes fins pratiques impossible auparavant.
- C3 La présentation graphique engendrée par le nouvel élément structurel qu'est le bloc, permet une meilleure visualisation des impacts d'un projet.
- C4 L'utilisation de plusieurs graphes afin de représenter les impacts d'un projet dont la réalisation s'effectue par étape, s'est avérée efficace.

¹ Conclusions: C

² Recommandations: R

C5 Concernant la définition mathématique du graphe de cohérence, on arrive à lui attribuer les caractéristiques suivantes:

- 1-graphe orienté
- non réflexif
- antisymétrique, donc sans circuits
- simplement-connexe

En un mot ce 1-graphe connexe est une hiérarchie.

C6 Après avoir décrit et caractérisé la matrice booléenne associée à un graphe de cohérence, on lui attribue certaines utilités. Ainsi, ce type de matrice facilite le calcul des degrés intérieur et extérieur, lesquels nous font connaître l'étendue des effets provoqués par chacun des éléments du graphe de cohérence. De plus, la matrice booléenne permet l'ordonnement d'un graphe, donc facilite la construction d'un graphe de cohérence dans sa mise en niveau.

C7 La matrice d'incidence est utilisée dans l'application de la méthode de la dynamique polyédrale. Cette technique mathématique, à partir de la définition de certaines mesures, permet une interprétation au niveau de la structure d'un système. Cependant, tel que présentée initialement, elle ne peut être appliquée qu'aux graphes de cohérence à 2 niveaux. Une fois accepté, cet algorithme peut être étendu aux graphes de cohérence à plusieurs niveaux, mais comportant une relation complète entre 2 niveaux consécutifs. Et afin de rejoindre tous les graphes de cohérence, une mesure appelée mesure d'importance est développée. Celle-ci

permet de qualifier l'importance d'une cause par rapport à celles rencontrées sur le même niveau. Ceci est possible aussi bien pour les effets bénéfiques que dommageables à condition que ces 2 types d'effets soient séparés lors des calculs. Par la suite, les résultats obtenus sont comparés.

- C8 La revue de littérature, effectuée dans le cadre de l'identification des impacts du harnachement d'une rivière à des fins hydro-électriques, a démontré qu'il existe une carence évidente à ce niveau. Plus particulièrement, la phase "construction d'un complexe hydro-électrique" est celle qui est la plus négligée au niveau de la littérature scientifique.
- C9 Dans le cas de la rivière Chamouchouane, les étapes de "mise en eau" et "d'exploitation" sont celles qui auront le plus d'impacts sur la faune aquatique. De manière plus précise, la ouananiche est l'espèce qui sera le plus affectée. Sa disparition presque complète du lac Saint-Jean peut-être considérée comme une conséquence probable de la réalisation du complexe hydro-électrique de la rivière Chamouchouane.
- R10 Suite à l'adaptation de la méthode de la dynamique polyhédrale aux graphes de cohérence à plusieurs niveaux reliés, l'interprétation serait plus complète s'il était possible d'utiliser la notion de vecteurs de structure et d'obstruction. Il serait donc avantageux de trouver une façon de déterminer un type de vecteurs similaire. De plus, un

perfectionnement de l'adaptation de cette méthode, en termes mathématiques, serait à considérer.

- R11 L'utilisation du graphe de cohérence pour identifier les impacts du hanchement d'une rivière à des fins hydro-électriques a permis de mettre à jour qu'il existe un manque de connaissances à ce niveau. La recherche doit s'accroître afin de combler ce vide. Une étude du milieu touchée avant, pendant et après la réalisation d'un tel projet pourrait apporter des résultats plus intéressants.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACKERMANN, W.C., G.F. WHITE, et E.B. WORTHINGTON. (1973).
"Man-Made Lakes: their problems and environmental effects". Williams
burd Press, Richmond, Virginia; 847 p.
- AITKEN, A.C. (1965).
"Determinants and matrices". Oliver and Boyd Ltd., Edinburg, G.B., 144
p.
- ALBIGES, M., A. COIN et H. JOURNET. (1969).
"Étude des structures par les méthodes matricielles". Éditions Eyrol-
les, Paris, 253 p.
- ANONYME. (1979).
"Le bureau d'audiences publiques sur l'environnement". Documents d'in-
formation, BAPE, Gouvernement du Québec, Québec.
- ANONYME. (1980 a).
"Études préliminaires, Rivière Chamouchouane". Vice-présidence Informa-
tion, Hydro-Québec, Montréal, Québec, septembre.
- ANONYME. (1980 b).
"Études préliminaires, Rivière Chamouchouane". Renseignements généraux.
Hydro-Québec, Montréal, Québec, août.
- ANONYME. (1982).
"Environnement et aménagement". Comité de la formation continue, corpo-
ration professionnelle des urbanistes du Québec. Compte rendu, journée
d'étude, 17 février 1982, (août 1982).

ARMSTRONG, E.L. (1973).

"Dam Construction and the Environment". Commission internationale des Grands Barrages, onzième congrès des Grands Barrages, Madrid, Espagne.

ATKIN, R.H. (1974).

"Mathematical structure in human affairs". Heinemann Publishing Company, London.

ATKIN, A. et J. CASTI. (1977).

"Polyhedral dynamics and the geometry of systems". International Institute for Applied Systems Analysis, Research report RR-77-6, Austria, 36 p.

ATKINS, W.C. et D. BURQUE, Jr. (1971).

"Interim report: social, economic and environmental factors in highway decision making". Research conducted for the Texas Highway Department in Cooperation with the U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration: College Station, Texas; Texas Transportation Institute, Texas A & M University (oct. 1971).

BARBEAU, U. (1978).

"Théorie des graphes", notes du cours Mat-14286, Université Laval, Sainte-Foy, Québec, p. .

BAXTER, R.M. et P. GLAUDE. (1980).

"Environmental effects of Dam and impoundments in Canada: experience and prospects". Can. Bull. Fish. Aquat. Sci. 205: 34 p.

BEAK LIMITÉE (Les conseillers Beak Limitée) (1979).

"Étude des répercussions écologiques de l'aménagement hydro-électrique de la rivière Chamouchouane, volume 2, répercussions sur le milieu aquatique". Hydro-Québec, Montréal, Québec, 55 p.

BENTLEY, W.W. et H.L. RAYMOND. (1969).

"Passage of Juvenile fish through orifices in gatewells of turbine intakes at McNary Dam". Trans. Amer. Fish. Soc., no. 4.

BORN, S.M. et D.A. STEPHENSON. (non daté).

"Water management for shoreline erosion control on the Chippewa Flowage". Journal of soil and water conservation.

BOURRET, D. et G. THIBAUT. (1978).

"Application du graphe de cohérence et description des impacts socio-économiques et environnementaux suite à l'implantation du complexe forestier intégré (St-Félicien)". Thèse de maîtrise, Institut national de la recherche scientifique (INRS-Eau), Université du Québec, 173 p.

BROUARD, D. et J. TALBOT. (1979).

"Dénombrement des ouananiches (Salmo salar) adultes en migration dans la rivière Mistassini de 1975 à 1979". Service de l'exploitation de la faune, Direction régionale Saguenay lac Saint-Jean, Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche, Gouvernement du Québec, Québec, Canada.

BUMS, P.G. et D.J. CHADWICK. (1977).

"Channel Morphology below Reservoir Storage Projects". Environmental Conservation, Vol. 4, No. 4.

BURY, B.R. (1972).

"The effects of Diesel Fuel on a stream fauna". Calif. Fish. and Game, 58(4): 292-295.

CASTI, J., J. KEMPF, L. DUCKSTEIN, et M. FOGEL. (1979).

"Lake ecosystems: a polyhedral dynamics representation". Ecological Modelling, 7: 223-237.

CENTRAL NEW YORK REGIONAL PLANNING AND DEVELOPMENT BOARD. (1972).

"Environmental resources management". Prepared for department of HUD. NTIS, PB 217 517.

CHEN, C.W. et G.T. ORLOB. (1971).

"Simulation for aquatic environments". Water Resources Engineers, Walnut Creek, California.

COUILLARD, D. (1981).

"Évaluation des impacts environnementaux dus aux rejets d'une usine de pâte kraft sur la Salmo salar ouananiche à l'aide d'une nouvelle méthode: le graphe de cohérence". Environmental Pollution (series B) 2: 145-161.

COUILLARD, D. (1981a).

"Systems analysis for description of environmental pollution". Water Supply and Management, 5: 183-194.

COUILLARD, D. (1982).

"Quality of life: the importance of man-environment relations and a tentative conceptual model". Journal of Environmental Systems, 12(2): 163-184.

COUILLARD, D. et D. MASCOLO. (1983).

"Graph theory applie to evaluation of water sciences research system". Journal of Environmental Systems. (soumis pour publication).

COUILLARD, D. et D. MASCOLO. (1979).

"Graphes de cohérence et évaluation des impacts". Rapport scientifique no 80, Institut national de la recherche scientifique (INRS-Eau), Université du Québec, Sainte-Foy, Québec, 26 p.

DEE, N. (1972).

"Environmental evaluation system of water resources planning". Report to the U.S. Bureau of Reclamation, Columbus, Ohio: Battelle Memorial Institute.

DUTHIE, H.C. et M.L. OSTROFSKY. (1975).

"Environmental Impact of the Churchill falls (Labrador), Hydroelectric project: a preliminary assessment". J. Fish. Res. Board Can., 32: 117-125.

GAUTHIER, POULIN, THÉRIAULT LIMITÉE. (1976).

"Étude du déboisement par les agents naturels dans les réservoirs LG2 et Opinaca, rapport 2, efficacité des agents naturels". Société d'énergie de la Baie James, Montréal, Québec.

GEEN, G.H. (1974).

"Effects of hydroelectric development in western Canada on aquatic ecosystems". J. Fish. Res. Board Can. 31: 913-927.

GEEN, G.H. (1975).

"Ecological consequences of the proposed Moran Dam on the Fraser River". J. Fish. Res. Board Can. 32: 126-135.

GIBLIN, P.J. (1977).

"Graphs, surfaces and homology". Chapman et Hall, London, 329 p.

GRAF, W.L. (1980).

"The effect of dam closure on downstream rapids". Water Resources Research, 16(1): 129-136.

HADLEY, G. (1962).

"Linear programming". Addison-Wesley Publishing Company Inc., Massachusetts U.S., 520 p.

INSTITUTE OF ECOLOGY, UNIVERSITY OF GEORGIA. (1971).

"Optimum pathway matrix analysis approach to the environmental decision making process: Test case: relative impact of proposed highway alternatives". Athens, Georgia, University of Georgia, Institute of Ecology (mimeographed).

KERR, J.A. (1973).

"Physical consequences of human interference with rivers". Fluvial processes and sedimentation, proc. Hydrology symp. Edmonton, ALTA, May 809, 1973. Prepared for the committee on hydrology by Inland Waters. Dir. Environ. Canada, 759 p. pp. 665-696.

KRAUSKOPF, T.M. et D.C. BUNDE. (1972).

"Evaluation of Environmental Impact Through a Computer Modeling Process". Environmental Impact Analysis: Philosophy and methods. (Eds) Robert Ditton and Thomas Goodale, Madison, Wisconsin, University of Wisconsin Sea Grant Program, pp. 107-125.

KUNTZMANN, J. (1972).

"Théorie des réseaux (graphes)". Dunod, Paris, 288 p.

LAGLER, K.F. (1971).

"Ecological effects of Hydroelectric Dams. Power generation and environmental change". Cambridge, M.I.T. Press, pp.: 133-157.

LANCASTER, P. (1969).

"Theory of matrices". Academy Press, New York and London, 316 p.

LANG, S. (1971).

"Linear algebra". Addison-Wesley, Publishing Cie, Massachusetts U.S., 400 p.

LECLERC, M., D. COUILLARD et H. DEMARD. (1979).

"Quelques considérations sur la loi modifiant la loi du Québec de la qualité de l'environnement". Eau du Québec, 12(2): 123-131.

LELMKUHL, D.M. (1972).

"Change in thermal Regime as a cause of Reduction of Benthic Fauna Downstream of a Reservoir". J. Fish. Res. Board Canada, 29: 1329-1332.

LEOPOLD, L.B. (1971)

"A procedure for Evaluating Environmental Impact". Geological Survey, Circular 645, Washington, 16 p.

LEPINE, G. (1975).

"Méthodologie d'évaluation des impacts". Thèse de maîtrise, Institut national de la recherche scientifique (INRS-Eau), Université du Québec, Sainte-Foy, Québec, 87 p.

LITTLE, A.D. (1971).

"Transportation and Environment: Synthesis for Action: Impact of National Environmental Polity Act of 1969 on the Department of Transportation: Vol. 3: Options for Environmental Management". Prepared for Office of the Secretary, Department of Transportation.

LUPIEN, ROSENBERG, ASS. INC. (1979).

"Aménagement de la rivière Chamouchouane, étude géomorphologique d'avant-projet". Présenté à la Direction Environnement d'Hydro-Québec, octobre.

MCDONALD, J.R. et R.A. HYATT. (1973).

"Supersaturation of nitrogen in waters during passage through hydroelectric turbines at Mactaquac Dam". J. Fish. Res. Board Can. 30: 1392-1394.

MARTEL, A. et R. LESAGE. (1976).

"Situation de la Ouananiche au lac Saint-Jean". Texte présenté lors du lancement de l'opération Ouananiche 76. M.L.C.P., Service de l'aménagement de la faune, district du Saguenay-Lac-Saint-Jean, mai.

MARTEL, A. et R. LESAGE. (non daté).

"Mémoire concernant les populations de ouananiches (Salmo salar ouananiche) du lac Saint-Jean en relation avec l'implantation d'une usine de pâte kraft projetée par Donohue St-Félicien inc. M.L.C.P. Service de l'aménagement de la faune, district Saguenay-Lac Saint-Jean.

McHARG, I. (1969).

"A comprehensive highway route-selection method. Highway research record, number 246, 1969, pp. 1-15, or McHarg, design with nature". Garden City, New York, Natural History Press, pp. 31-41.

MOORE, J.L. (1973).

"A methodology for evaluating manufacturing environmental impact statements for Delaware's coastal zone". Report to the State of Delaware, Columbus, Ohio: Battelle Memorial Institute.

MULTIAGENCY TASK FORCE. (1972).

"Guidelines for implementing principles and standards for multi-objective planning of water resources". Review draft, Washington, U.S. Bureau of reclamation (december).

ODUM, E.P. (1971).

"Optimum pathway matrix analysis approach to the environmental decision making process". Test case: Relative Impact of Proposed highway alternatives. Inst. Ecol., Univ. GA, Athens.

OSTROFSKY, M.L. et H.C. DUTHIE. (1975).

"Primary productivity, phytoplankton and limiting nutrient factors in Labrador lakes". Int. Revue Ges. Hydrobiol. 60(2): 145-148.

PALEY, H. et P.M. WEICHSEL. (1966).

"A first course in abstract algebra". Holt, Reinhart and Winston Inc., New-York, 334 p.

PICHT, G. (1970).

"Réflexions au bord du gouffre". Laffont, Paris, 119 p.

ROBERTS, F.S. (1978).

"Graph theory and its applications to problems of Society". Society for Industrial and applied mathematics, Philadelphia, 122 p.

ROCHE ASSOCIE. (1981).

"Étude d'impact sur l'environnement, études préliminaires, aménagement de la rivière Chamouchouane". Roche Associé Ltée, Groupe Conseil, 3 tomes.

ROY, B. (1969).

"Algèbre moderne et théorie des graphes orientées sur les sciences économiques et sociales, tome 1: notions et résultats fondamentaux". Dunod, Paris, 502 p.

ROY, B. (1970).

"Algèbre moderne et théorie des graphes orientées vers les sciences économiques et sociales, tome 2: applications et problèmes spécifiques". Dunod, Paris, 753 p.

RUGGLES, C.P. et W.D. WATT. (1975).

"Ecological changes due to hydroelectric development on the Saint John River". J. Fish. Res. Board Can. 32: 161-170.

RYDER, R.A. et L. JOHNSON. (1972).

"The future of salmonid communities in North American Oligotrophic Lakes". J. Fish. Res. Board Can. 29: 941-94

SABOURIN, J.R. (1981).

Communication personnel. Hydro-Québec, chargé d'avant-projet Chamouchouane, avril.

S.A.G.E. Ltée. (1980).

"Étude des répercussions écologiques de l'aménagement hydroélectriques de la rivière Chamouchouane, répercussion sur le milieu terrestre". Présenté à la Direction de l'Environnement, Hydro-Québec, Sage Ltée,

SASSEVILLE, J.L., A. DELISLE, Y. DESCÔTEAUX, L. POTVIN et M. LECLERC.
(1977).

"Vers une nouvelle génération de méthodologies d'évaluation des répercussions environnementales". Institut national de la recherche scientifique (INRS-Eau), Université du Québec, rapport scientifique no 74, 203 p.

SCHLESINGER, B. et D. DAETZ. (1973).

"A conceptual framework for applying environmental assessment matrix techniques. The Journal of environmental sciences, July/August, pp. 11-16 .

SMITH, W.L.

"Quantifying the environmental impact of transportation systems". Van Doren-Hazard-Stalling-Schnacke, Topeka, Kansas (undated) mimeographed).

SORENSEN, J. (1973).

"A framework for identification and control of resource degradation and conflict in the multiple use of the coastal zone". Berkeley, University of California, Department of Landscape Agriculture (1970), and SORENSEN and J.E. PEPPER, Procedures for regional clearinghouse review of environmental impact statements - Phase two, report to the Association of Bay Area Governments (April, 1973).

SPENCE, J.A. et H.B.N. HYNES. (1971a).

"Differences in Benthos upstream and downstream of an Impoundment". J. Fish. Res. Board Can. 28(1): 35-43.

SPENCE, J.A. et H.B.N. HYNES. (1971b).

"Differences in fish populations upstream and downstream of a mainstream impoundment". J. Fish. Res. Board Can. 28(1): 45-46.

STOLL, R. (1952).

"Linear algebra and matrix theory". Mc Graw-Hill Book Cie Inc., New-York, 272 p.

TALBOT, J. et R. DESJARDINS. (1981).

"Dénombrement des ouananiches (Salmo salar) adultes en migration dans les rivières Aux Saumons et Chamouchouane en 1980". Direction régionale Saguenay-Lac-Saint-Jean, Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche, Gouvernement du Québec, Québec, Canada.

THERRIEN-BOLLULO, D. (1976).

"Techniques d'évaluation d'impacts de projet sur l'environnement". Congrès annuel de l'association Québécoise des Techniques de l'eau (AQTE), .

THERRIEN-BOLLULO, D. (non daté).

"Technique d'identification et d'évaluation d'impacts de projet sur l'environnement". Notes de cours "Impacts des projets sur l'environnement", école polytechnique de Montréal, département de génie civil, division génie de l'environnement.

TRUDEL, R. (1977).

"L'évaluation de l'impact technologique des usines de pâtes et papiers de la rivière Saint-François". Thèse de maîtrise, Institut national de la recherche scientifique (INRS-Eau), Université du Québec, 174 p.

TULSA DISTRICT. U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. (1972).

"Matrix analysis of alternatives for water resource development". Draft technical paper.

WARNER, M.L. et E.H. PRESTON. (1974).

"A review of environmental impact assessment methodologies". Report EPA-600/5-74-002 for the environmental protection agency, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C. 20460, 27 p.

WESTGARD, R.L. (1964).

"Physical and biological aspects of gas bubble disease in impounded adult Chinook Salmon at McNary Spawning Channel". Trans. Amer. Fish. Soc. 93: 306-309.