

3605914E

ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

EVALUATION TECHNICO-ECONOMIQUE DU PROGRAMME
FEDERAL-PROVINCIAL DE CARTOGRAPHIE ET DE
ZONAGE DES REGIONS INONDABLES
APPLICATION AU QUEBEC

Premier rapport d'avancement des activités
1984-1985

présenté au

Ministère de l'Environnement
Ottawa-Canada

par

Le Groupe de Recherche sur l'Eau en
Milieu Urbain

102777

GB
568.15
E92
1985

Montréal, février 1985

RESUME

En 1977, dans le cadre du programme canadien de réduction des dommages dus aux inondations, la Communauté régionale de l'Outaouais a appliqué un règlement de zonage afin d'éliminer l'implantation de nouvelles constructions vulnérables dans les plaines d'inondations. l'objectif de cette recherche est de vérifier l'impact économique de ce programme. Les auteurs présentent les caractéristiques hydro-économiques de la région et exposent la méthodologie utilisée pour quantifier les bénéfices reliés à cette intervention.

TABLE DES MATIERES

	<u>PAGE</u>
SOMMAIRE	iii
RESUME	iv
TABLE DES MATIERES	v
LISTE DES TABLEAUX	vi
LISTE DES FIGURES	vii
 INTRODUCTION	 1
 1.0 CARACTERISTIQUES DE LA ZONE D'ETUDE	 4
1.1 La zone d'étude	4
1.2 Caractéristiques hydrologiques de la rivière des Outaouais	6
1.3 L'intervention de zonage	8
1.4 Dommages subis par la région de l'Outaouais	9
1.5 Données hydrologiques et économiques disponibles	9
1.6 Dommages reliés au secteur résidentiel	12
 2.0 CONSIDERATIONS THEORIQUES	 14
2.1 Le système hydroéconomique	14
2.2 Dommages unitaires	17
2.3 Dommages unitaires moyens	19
2.4 Dommages unitaires moyens annuels	20
2.4.1 Le modèle des valeurs extrêmes	20
2.5 Dommages moyens annuels	25
2.6 Calcul des dommages résiduels	30
2.7 Calcul des dommages du système de base	31
2.8 Analyse bénéfices-coûts	32
 BIBLIOGRAPHIE	 33
 ANNEXE - A: Description du projet	 35

LISTE DES TABLEAUX

<u>TABLEAU</u>	<u>PAGE</u>
1. Indemnités versées lors des crues de 1974 et de 1976	10
2. Nombre de résidences affectées par les crues de récurrence 20 et 100 ans	27

LISTE DES FIGURES

<u>FIGURE</u>	<u>PAGE</u>
1. Bassin versant de la rivière des Outaouais	5
2. Relation dommages-fréquence de dépassement	16
3. Relation dommages unitaires moyens-fréquence de dépassement	24
4. Relation nombre de résidences affectées-fréquence de dépassement	28

INTRODUCTION

Il ne se passe pas une année complète sans que les médias ne nous informent qu'une inondation frappe sévèrement une ville du Japon, de Chine, d'Europe, du Mid-West américain ou du Canada. Les inondations constituent pour l'homme un problème majeur et de grande envergure par l'importance des sommes qu'il investit à les combattre.

Historiquement, les rives des cours d'eau ont attiré l'homme qui bénéficiait ainsi des divers avantages que lui procurait la proximité de l'eau: la navigation était jadis le moyen de transport privilégié, l'eau lui permettait d'irriguer les terres cultivables, de s'approvisionner pour ses besoins personnels, de se récréer, de disposer de ses déchets, etc...

Toutefois, ce faisant, il s'exposait au risque des inondations; face à ce danger, au lieu de quitter les lieux, il a mis sur pied des programmes de protection ou de contrôle des crues.

Au fil des ans, ces programmes se sont multipliés et contrairement à ce que l'on espérait, les dommages n'ont cessé de croître. El-Jabi (1980) explique ce phénomène, qu'il appelle la spirale ascendante des crues-dommages, par cinq raisons principales:

- i) l'augmentation des activités économiques dans les plaines inondables;
- ii) l'accroissement continu du pourcentage d'occupation des régions inondables;
- iii) la surévaluation par la population du degré de protection qu'apportent les ouvrages de protection;
- iv) le manque de données sur la fréquence des crues et sur les activités susceptibles d'être affectées par elles;
- v) le changement des caractéristiques hydrologiques des crues.

Au Canada, ce phénomène est très sérieux: bien que les différents paliers de gouvernement aient dépensé des sommes considérables pour la construction d'ouvrages et pour le versement d'indemnités, des pertes importantes sont accusées année après année, et les risques de désastre continuent d'augmenter à cause du développement accru des plaines inondables.

C'est pourquoi la lutte contre les inondations est une politique poursuivie par nos gouvernements, tant fédéral que provinciaux. Cette lutte comporte deux objectifs à court et à long terme. A court terme, il s'agit d'enrayer la progression des dommages causés par les inondations, tandis qu'à long terme, il s'agit de diminuer, et même d'éliminer ces dommages.

Afin de donner suite à ces objectifs, les gouvernements fédéral

et provincial du Québec ont signé, le 4 décembre 1976, la convention sur la cartographie des risques d'inondations. Le but de cette cartographie est de réduire l'implantation de nouvelles constructions vulnérables dans les plaines inondables.

La Communauté régionale de l'Outaouais fut la première région à réglementer la construction dans les zones désignées. Toutes les municipalités faisant partie de la CRO étaient assujetties à ce nouveau règlement.

Dans ce contexte, l'objectif de cette recherche est de vérifier l'impact économique de ce programme, appliquée à la région de l'Outaouais, à l'aide d'une analyse bénéfices-coûts.

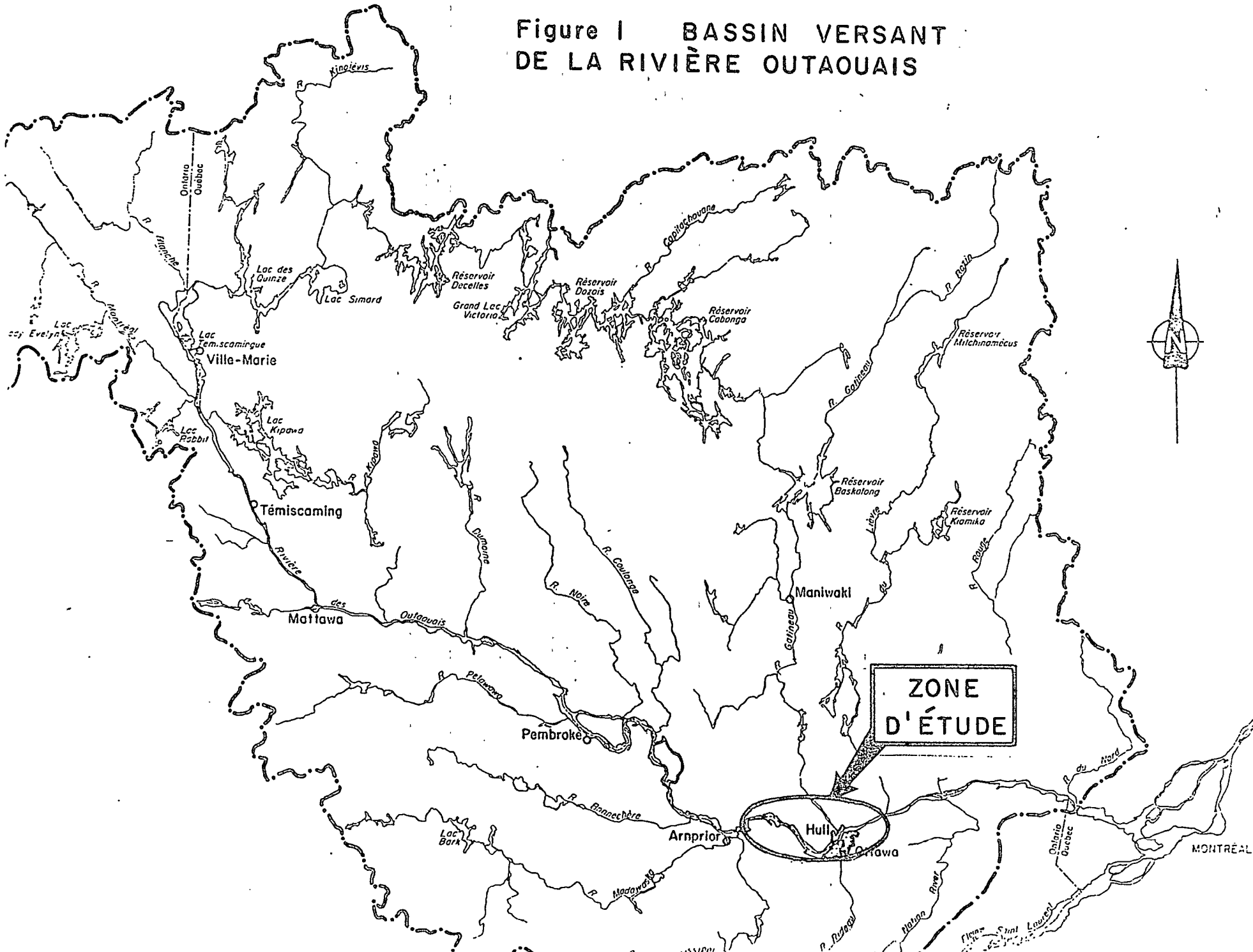
1. CARACTERISTIQUES DE LA ZONE D'ETUDE.

1.1 La zone d'étude.

La rivière des Outaouais forme la frontière entre les provinces du Québec et de l'Ontario sur la plus grande partie de son parcours. Son bassin versant a une superficie totale de 146,334 kilomètres carrés, 65% étant situé au Québec, 35% en Ontario. Elle possède un régime hydraulique très variable avec un débit moyen de 2200 m³/s, un débit maximal qui peut atteindre 10,000 m³/s et un débit minimal de 350 m³/s.

Depuis sa source à l'est du réservoir Dozois jusqu'à son exutoire dans le lac des Deux Montagnes, la rivière parcourt plus de 1130 kilomètres. Pour ce travail, la région d'étude se limitera au tronçon compris entre les municipalités de Pontiac et de Masson; ce qui représente une longueur d'environ 100 kilomètres. La figure 1 présente approximativement sa localisation.

Le bassin de la rivière Gatineau a une superficie totale de 23,600 kilomètres carrés et depuis sa source jusqu'à son exutoire dans la rivière des Outaouais au niveau de la ville de Hull, la rivière parcourt environ 360 kilomètres. La région d'étude se limitera au

[illegible][illegible][illegible]

tronçon compris entre la municipalité de La Pêche et l'exutoire de la rivière; ce qui représente une longueur d'environ 50 kilomètres.

Il y a donc six municipalités qui sont concernées par l'étude. Il s'agit des municipalités de ~~Pontiac, Aylmer, Gatineau, Masson, Hull-Ouest et La Pêche~~. La ville de Hull, par des interventions de type structurale, a éliminé tout risque d'inondations d'une récurrence inférieure à 100 ans; elle est donc exclue de l'étude. C'est en ces six zones appelées cellules hydroéconomiques que nous diviserons la zone d'étude.

Cette division a été faite en considérant les faits suivants:

- i) homogénéité de la valeur du stock de capital dans chaque cellule hydroéconomique;
- ii) dénivellation faible du profil d'eau entre le niveau amont et aval de chaque cellule.

1.2 Caractéristiques hydrologiques de la rivière des Outaouais.

L'importance, la configuration et la topographie du bassin versant de la rivière des Outaouais signifie des conditions météorologiques très différentes et conséquemment une réponse hydrologique très variable de la part de ses tributaires.

Ce temps de réponse très variable des principaux tributaires

juxtaposé aux larges variations de température sur le bassin se combinent pour produire deux pointes de crues distinctes sur l'hydrogramme de crues printannier.

La première crue est produite principalement par les tributaires de la rive sud qui ne sont pratiquement pas régularisés. La seconde, qui survient généralement trois semaines plus tard, résulte de la fonte de neige des tributaires de la rive nord et de la partie supérieure du bassin qui sont en partie régularisés.

Le régime hydraulique de la rivière des Outaouais est fortement influencé par l'existence de 27 réservoirs et de 43 centrales hydroélectriques situés majoritairement sur la partie supérieure du bassin versant et qui contrôlent environ 60% de sa superficie. La plupart de ces principaux ouvrages de contrôle furent construits afin d'exploiter le potentiel hydroélectrique de la région et de satisfaire la demande locale en énergie.

En 1976, un Comité de planification de la régularisation de la rivière des Outaouais a été créé conjointement par les différents propriétaires des ouvrages de contrôle: soit les gouvernements du Canada, du Québec et de l'Ontario et des sociétés hydroélectriques de l'Ontario et du Québec. Ce Comité a élaboré une politique d'exploitation de ces ouvrages dans le but de minimiser les risques d'inondations dans les régions susceptibles d'être affectées tout en tenant compte de la production d'énergie électrique. Depuis 1980, le

Secrétariat du Comité gère le modèle de régularisation.

1.3 Intervention dans la plaine inondable.

La réglementation de zonage des plaines inondables au niveau de la Communauté régionale de l'Outaouais (CRO) date du 14 avril 1977. Elle fait partie d'un plan d'aménagement global du territoire de la CRO.

Cette réglementation définit deux zones: la zone de grand courant correspondant à la partie de la zone inondable qui se trouve en deçà de la cote de récurrence de 20 ans et la zone de faible courant correspondant à la partie dont la cote d'élévation varie entre la cote de récurrence de 20 ans et celle de 100 ans.

Essentiellement, cette politique stipule qu'aucun nouvel ouvrage ne doit être permis dans la zone de grand courant et que seuls les ouvrages immunisés à la cote de 100 ans et selon des normes spécifiques peuvent être érigés en zone de faible courant. De plus, ~~la politique prévoit une interdiction générale de nouvelles voies de communication et de nouveaux réseaux d'égouts et d'aqueducs en zone de grand~~ courant.

1.4 Dommages subis par la région de l'Outaouais.

La région de l'Outaouais est fréquemment frappée par les inondations. Notamment, en 1974 et en 1976, les crues printannières ont causé d'importants dommages. Le tableau 1 présente les indemnités versées aux différentes municipalités par le gouvernement du Québec pour ces deux crues.

1.5 Données hydrologiques et économiques disponibles.

La connaissance des caractéristiques hydrologiques et économiques de la région de l'Outaouais est essentielle à l'estimation des dommages causés par les inondations.

Les données hydrologiques recueillies aux différentes stations hydrométriques nous permettront de calculer la hauteur de submersion associée à chaque crue. En supposant le niveau de base équivalent au niveau maximal où les dommages sont nuls, la hauteur de submersion sera obtenue en soustrayant le niveau d'eau de base du niveau enregistré lors de cette crue. Ce résultat deviendra par la suite une entrée au modèle utilisé pour l'estimation des dommages.

Le profil longitudinal du tronçon réunissant les municipalités de Gatineau et de Masson est quasi horizontal. Il sera donc possible de connaître les hauteurs de submersion associées aux crues en faisant

TABLEAU 1: Indemnités versées lors des crues de 1974 et de 1976.

<u>Municipalité</u>	<u>1974</u>	<u>1976</u>
Aylmer	-	\$ 2,800
Gatineau	\$ 1,570,295	\$ 1,026,264
Hull	-	\$ 6,425
Hull-Ouest	\$ 3,315	-
La Pêche	\$ 132,089	\$ 4,599
Masson	\$ 97,403	\$ 144,617
Pontiac	-	\$ 8,733
<u>TOTAL</u>	\$ 1.8 million	\$ 1.2 million

simplement l'inventaire de ces crues. Pour ce faire, les données de niveau journalier des stations situées à Hull (1965-1982) et Cumberland (1918-1982) sont disponibles.

La municipalité d'Aylmer est située tout au long des rives du lac Deschênes; le niveau d'eau y est donc constant. Une station hydrométrique a enregistré les niveaux journaliers du lac durant la période s'étalant de 1961 à 1983. De plus, on a étalonné la relation entre le niveau du lac et le débit sortant.

La municipalité de Pontiac offre également une dénivellation faible entre ses niveaux amont et aval. Les données sur le niveau aval sont fournies par la station située au lac Deschênes (1961-1983) et celles sur le niveau amont, par la station située au Quai de Quyon (1915-1978).

Concernant la rivière Gatineau, nous utiliserons les courbes de remous de récurrence 20 et 100 ans. En rapport avec le projet ~~"Estimation des dommages-moyens-causés-par-les-inondations"~~ préparé par le ~~GREMU~~, ces courbes ont été tracées en 1980 sur le tronçon Farmers-Hull par le Ministère de l'Environnement du Québec. De plus, les débits journaliers enregistrés aux stations Rapides Farmers (1972-1984) et Paugan (1964-1984) sont disponibles.

Des données sur le stock de capital économique qui se trouve dans les plaines d'inondations et dans chacune des cellules

hydroéconomiques sont également requises pour l'estimation des dommages. Ces données ont été obtenues par l'entremise de Statistique Canada, du Ministère des Affaires Municipales du Québec et de la Communauté régionale de l'Outaouais.

~~Statistique Canada nous a fourni des données sur la population, et sur le nombre de propriétés résidentielles de chacune des municipalités concernées pour les années suivantes: 1951, 1961, 1966, 1971, 1976 et 1981.~~

~~Par le Ministère des Affaires Municipales et la CRO, nous avons obtenu l'évaluation municipale imposable totale du secteur résidentiel de chacune des municipalités concernées et pour les années suivantes: 1970 à 1984.~~

~~De plus, un document publié par le gouvernement du Québec sous le titre: "Perspectives démographiques régionales, 1981-2006" et un rapport sur les perspectives démographiques de la région de l'Outaouais nous seront utiles pour l'estimation du taux de développement économique de chacune des cellules hydroéconomiques.~~

1.6 Dommages reliés au secteur résidentiel.

Il est à noter que cette application sera faite en considérant uniquement les dommages reliés au secteur résidentiel (chalets et

résidences permanentes). Concernant ces deux types de populations économiques, nous avons mené une enquête auprès de la CRO et avons obtenu les résultats suivants:

i) des chalets et des résidences permanentes occupent les plaines inondables de la municipalité d'Aylmer dans une proportion de 30% et de 70% respectivement;

ii) seulement des résidences permanentes occupent celles de la municipalité de Gatineau;

iii) seulement des chalets occupent celles des municipalités de Pontiac, de La Pêche, de Masson et de Hull-Ouest.

2.0 CONSIDERATIONS THEORIQUES.

2.1 Le système hydroéconomique.

Le plan d'aménagement d'une plaine par différents modes d'intervention doit rencontrer les diverses aspirations de la population impliquée. Il devra donc contenir diverses mesures pouvant assurer qu'au moins un des trois objectifs suivants sera atteint:

- i) ~~diminution des dommages existants;~~
- ii) ~~prévention de la création des dommages futurs;~~
- iii) ~~minimisation de l'impact des dommages résiduels;~~

Une grande variété de mesures de contrôle sont disponibles pour rencontrer ces objectifs. Elles sont de deux types: ~~structurale et~~ administrative. Dans le second groupe, figure l'intervention de zonage.

Cette intervention rencontre le second objectif cité car c'est une mesure par laquelle on contrôle le développement futur de façon à minimiser les pertes qui seraient engendrées par une occupation accrue des plaines inondables.

~~L'effet de cette mesure est une modification de la relation hauteur de submersion-dommages; pour une même hauteur de submersion,~~

~~les dommages sont moins élevés. La relation dommages-fréquence de~~
~~dépassement est également modifiée car elle dérive de la combinaison de~~
~~cette relation et de la relation hauteur de submersion fréquence de~~
~~dépassement, qui reste constante.~~

Les dommages moyens annuels qui sont mesurés par l'intégration de la fonction dommages-fréquence de dépassement diminuent donc également sous l'effet de l'intervention de zonage.

Les dommages moyens annuels constituent une information indispensable car elle nous renseigne sur les conditions économiques existantes et nous donne un outil pour l'estimation ~~des bénéfices~~
~~relatifs à la solution envisagée pour le contrôle des inondations.~~

Connaissant les dommages moyens annuels du système de base (non-régularisé) et du système régularisé (dommages résiduels), on peut par différence, déterminer les bénéfices reliés à l'intervention. La figure 2 exprime ce principe: les bénéfices moyens annuels reliés à l'intervention sont représentés par la surface comprise entre les courbes dommages-fréquence de dépassement du système de base et du système régularisé.

Dans le cas que nous étudions, ~~l'intervention de zonage~~
~~s'applique uniquement aux régions qui se trouvent sous la cote de~~
~~réurrence de 100 ans.~~ On remarquera alors que les courbes du système de base et du système régularisé sont superposées, c'est-à-dire que les

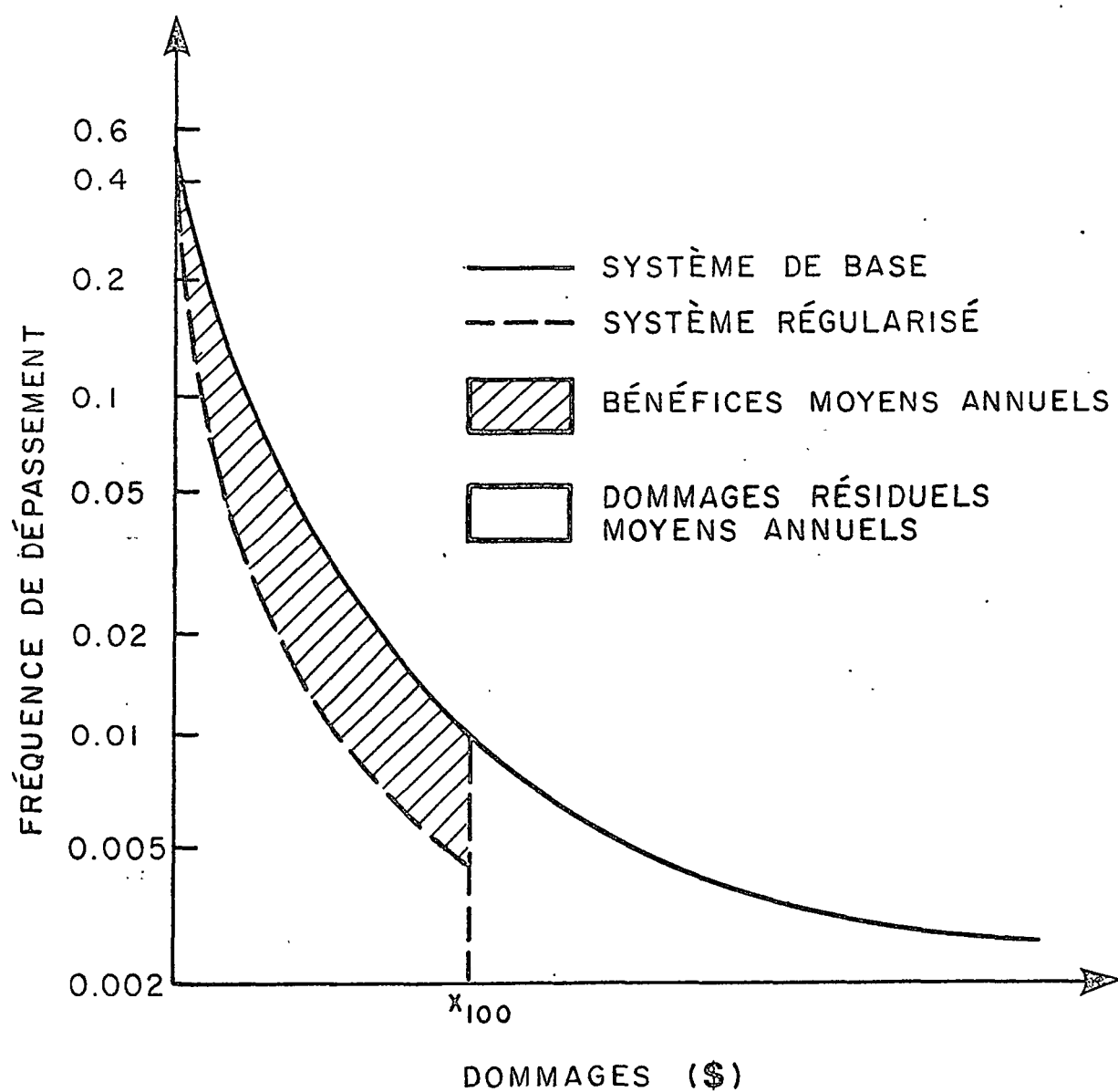


Figure 2 RELATION DOMMAGES-
FRÉQUENCE DE DÉPASSEMENT

9
bénéfices sont nuls pour des fréquences de dépassement inférieures à 0.01. Ce résultat dérive d'une hypothèse importante: ~~à savoir qu'il n'y a pas de débordement entre les zones désignées et les zones non désignées des municipalités étudiées.~~

Dans les prochaines sections, nous décrirons la démarche à suivre pour arriver à l'estimation des dommages moyens annuels du système de base et du système régularisé.

2.2 Dommages unitaires.

Le point de départ de l'estimation des dommages est la relation hauteur de submersion-dommages qui est donnée par la fonction de dommages. Cette fonction peut être exprimée sous la forme de Gompertz (Dantzig, 1956):

$$\frac{d}{k} = \frac{1}{\begin{bmatrix} -\alpha \\ e \\ e & -1 \end{bmatrix}} \cdot \begin{bmatrix} \lambda \cdot z \\ [1-e^{\lambda \cdot z}] \cdot e^{-\alpha} \\ -1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

où z est la hauteur de submersion et λ et α sont les paramètres à estimer.

Les paramètres λ et α sont constants pour toutes les crues et

dépendent des caractéristiques économiques de la région à l'étude. Les données nécessaires à l'estimation de ces paramètres ont été tirées de l'enquête après-crues menée par le CRAR (1977) dans la région de la rivière Richelieu. Connaissant les variables d (dommages), k (valeur du stock résidentiel touché par la crue) et z (hauteur de submersion), l'estimation de ces paramètres s'est faite par la méthode des moindres carrés pour des fonctions non-linéaires. Les valeurs obtenues sont: $\alpha=0.953$ et $\beta=0.108$. La relation 1 devient alors (El-Jabi, 1980):

$$\frac{d}{k} = \frac{1}{\begin{bmatrix} -0.953 \\ e \\ e \end{bmatrix}} \cdot \begin{bmatrix} -0.108 z & -0.953 \\ [1-e &] \cdot e \\ e & -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Par cette fonction, on obtient les dommages en pourcentage de la valeur d'une unité économique quelconque (d/k) en fonction de la hauteur de submersion qu'elle subit. Il suffit alors de connaître cette hauteur de submersion pour calculer les dommages unitaires. Puis, en multipliant ce résultat par la valeur marchande de l'unité en question, on obtiendra la valeur des dommages en dollars.

Puisqu'aucune enquête après-crues n'a été effectuée dans la région de l'Outaouais, il n'est pas possible d'estimer les paramètres α et β caractérisant la région de l'Outaouais. Mais en appliquant notre modèle uniquement sur le secteur résidentiel, nous pouvons supposer que ces deux paramètres sont les mêmes pour les deux régions. Cette

hypothèse signifie que le pourcentage d'endommagement causé par une certaine hauteur de submersion est le même pour une résidence qui est située dans la région de l'Outaouais que pour une résidence située dans celle du Richelieu.

2.3 Dommages unitaires moyens.

Il faut noter que l'équation (2) considère une hauteur de submersion constante pour tout le stock de capital physique d'une cellule hydroéconomique. Cependant, toutes les unités économiques ne sont pas situées au même niveau et ne subissent pas la même hauteur de submersion. Pour pallier à cette difficulté, on définit les dommages unitaires moyens correspondant à une certaine hauteur de submersion z . Ils correspondent aux dommages qui surviendraient en tenant compte de la répartition des unités économiques à l'intérieur d'une zone comprise entre une hauteur nulle ($z=0$) et l'élévation maximum ($z=z_1$).

Les dommages unitaires moyens s'expriment comme suit:

$$\left(\frac{\bar{d}}{k}\right) = \int_0^{z_{100}} \frac{F(z_1)}{z_1} dz \quad (3)$$

où $F(z_1)$ représente la fonction des dommages unitaires et z_{100} , la hauteur d'eau correspondant à la hauteur de submersion de récurrence 100 ans.

Le calcul de cette intégrale se fait à l'aide d'un programme de simulation "Continuous System Modelling Program, CSMP".

2.4 Dommages unitaires moyens annuels.

La méthodologie présentée dans les sections précédentes associe à chaque crue une estimation des dommages causés par cette crue. En faisant l'inventaire des crues sur une longue période d'enregistrement, on peut alors générer la série de dommages unitaires moyens, similaire à la série des valeurs extrêmes des débits.

Ouellette (1982) a démontré qu'il est possible d'appliquer à la série de dommages causés par les inondations, le modèle des valeurs extrêmes développé par Todorovic (1970). Ce qui nous permettra d'estimer les dommages unitaires moyens annuels.

2.4.1 Le modèle des valeurs extrêmes.

Un modèle basé sur la théorie des valeurs extrêmes et du nombre aléatoire de variables aléatoires présenté par Todorovic (1970) a été étudié par Zelenhasic (1970) et Rousselle (1972). Il a été prouvé que les excédances maximales suivent un processus stochastique où le nombre des excédances sont indépendantes et identiquement distribuées dans un intervalle de temps (T_{K-1}, T_K) soit la fonction de répartition

de l'excédance maximale $F_T(x)$ exprimée comme étant (Rousselle, 1972):

$$F_T(x) = \exp \left\{ - \sum_{k=1}^{K-1} [\Lambda(T_k) - \Lambda(T_{k-1})] \cdot [1 - H_k(x)] \right. \\ \left. - [\Lambda(t) - \Lambda(T_{K-1})] \cdot [1 - H_K(x)] \right\} \quad (4)$$

pour tout $k=1,2,\dots$, $t \in (T_{k-1}, T_k)$. $\Lambda(t)$ est le nombre moyen des excédances $\xi(0,t]$ et $H(x)$ est la fonction de répartition de la valeur des excédances, c'est-à-dire:

$$H(x) = P(\xi \leq x) \quad (5)$$

La fonction $H(x)$ peut être représentée par une loi statistique (normale, log-normale, gamma, etc...), suivant les caractéristiques hydrométéorologiques de la rivière ou de la région en question. Rousselle (1972) a montré qu'une fonction de répartition du type exponentiel s'applique de façon satisfaisante pour décrire la distribution des excédances dans la plupart des cas d'inondations:

$$H(x) = 1 - e^{-\beta x} \quad ; \quad \beta > 0 \quad (6)$$

où $\beta = \{E[\xi]\}^{-1}$

où E est l'opérateur de l'espérance mathématique.

Ainsi, deux cas sont à considérer:

i) les excédances sont indépendantes et identiquement distribuées

dans l'intervalle d'un an (Zelenhasic, 1970):

$$F_t(x) = \exp [-\Lambda(t) e^{-\beta x}] \quad (7)$$

où $\Lambda(t)$ est le nombre moyen d'excédances par année et β est le paramètre de la fonction exponentielle.

ii) les excédances sont indépendantes et identiquement distribuées dans l'intervalle d'une saison (Rousselle, 1972):

$$F_t(x) = \exp \left\{ -\Lambda(T_1) e^{-\beta_1 x} - [\Lambda(T_2) - \Lambda(T_1)] e^{-\beta_2 x} - [\Lambda(T_3) - \Lambda(T_2)] e^{-\beta_3 x} - [\Lambda(T_4) - \Lambda(T_3)] e^{-\beta_4 x} \right\} \quad (8)$$

où $\Lambda(t_1)$, $[\Lambda(t_2) - \Lambda(t_1)]$, ... représentent le nombre moyen d'excédances pour chaque saison et $\beta_1, \beta_2, \dots$ sont les paramètres de la fonction exponentielle.

Après avoir calculé les paramètres $\Lambda(t)$ et β grâce à une série d'observations des crues s'étendant sur une longue période d'enregistrement, on peut ainsi déterminer la fonction de répartition des dommages. La relation dommages-fréquence de dépassement peut alors être obtenue. Elle est donnée par l'équation suivante:

$$f(x) = 1 - F_t(x) \quad (9)$$

où $F_t(x)$ représente la fonction de répartition des dommages calculée

soit sur une base annuelle, soit saisonnière.

Une représentation typique de cette relation est présentée à la figure 3.

En résumé, l'estimation des dommages unitaires moyens annuels (DUMA) s'effectue par un calcul numérique basé sur une fonction statistique, elle-même obtenue par des observations des crues échelonnées sur une longue période, et qui représente la distribution des dommages d'inondation en fonction de leur probabilité d'apparition. Elle s'exprime de la façon suivante:

$$DUMA = \int_0^{\infty} f(x) dx \quad (10)$$

Dans le cas que nous étudions, seules les régions qui se trouvent sous la cote de récurrence de 100 ans subissent l'influence du zonage. L'estimation des dommages se fait donc uniquement sur ces régions. De plus, certaines conditions nous forcent à séparer ces régions en zones de grand courant et en zones de faible courant. La fonction des dommages unitaires moyens annuels pour les zones de grand courant s'écrit comme suit:

$$DUMAG = \int_0^{x_{20}} [1 - F_T(x)] dx \quad (11)$$

La fonction des dommages unitaires moyens annuels pour les zones de faible courant s'écrit:

$$DUMAF = \int_{x_{20}}^{x_{100}} [1 - F_T(x)] dx \quad (12)$$

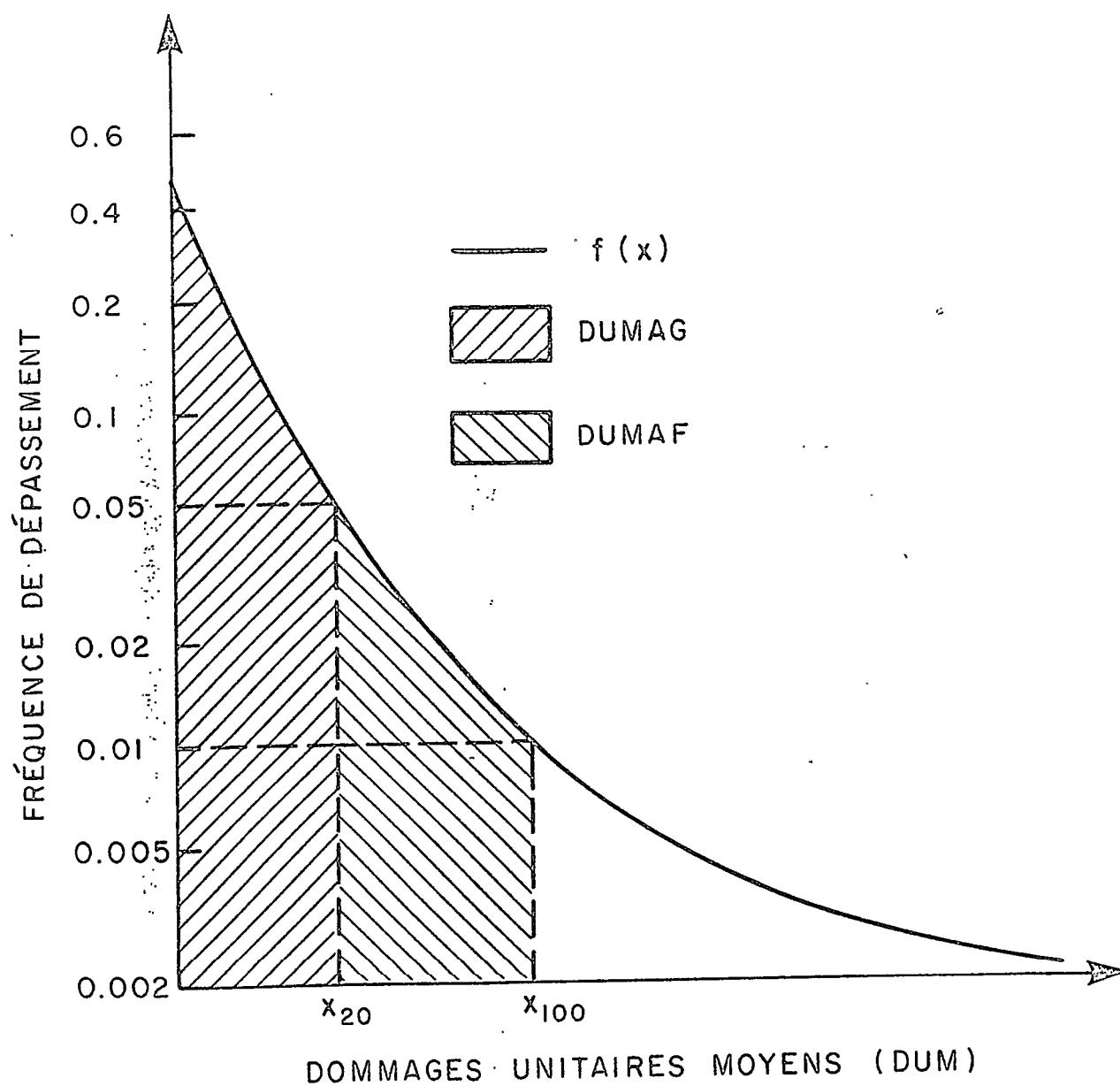


Figure 3 RELATION DOMMAGES UNITAIRES MOYENS -
FRÉQUENCE DE DÉPASSEMENT

Les parties hachurées de la figure 3 représentent ces deux fonctions.

2.5 Dommages moyens annuels.

La connaissance des dommages unitaires moyens annuels nous permet d'estimer les dommages moyens annuels à l'aide de la relation suivante:

$$\sum_{i=1}^n \frac{DMA}{(1+r)} = \sum_{i=1}^n [(DUMAF \cdot KF_i) + (DUMAG \cdot KG_i)] (1+r)^{-i} \quad (13)$$

~~où r est le taux d'actualisation et KF_i et KG_i représentent la valeur des résidences des zones de faible et de grand courant d'une cellule hydroéconomique affectées par la crue durant l'année i.~~

Comme les variables KF_i et KG_i ne sont pas disponibles, nous les avons estimées comme suit:

$$KF_i = KTF_i \cdot PMF \quad (14)$$

$$KG_i = KTG_i \cdot PMG \quad (15)$$

où PMF et PMG représentent le pourcentage moyen de résidences des zones de faible et de grand courant d'une cellule hydroéconomique affectées annuellement par les crues. ~~KTF_i et KTG_i représentent la valeur totale des résidences des zones de faible et de grand courant d'une cellule hydroéconomique durant l'année i.~~

Connaissant le nombre de résidences touchées à diverses cotes de récurrence dont celles de 20 et de 100 ans, nous pouvons estimer les variables PMF et PMG. Le tableau 2 montre le nombre de résidences affectées par les crues de récurrence 20 et 100 ans pour chacune des cellules hydroéconomiques.

Si l'on pose que $g(x)$ représente la relation entre la fréquence de dépassement et le nombre de résidences affectées, PMF et PMG s'expriment comme suit:

$$PMF = \int_{x_{20}}^{x_{100}} g(x) dx \quad (16)$$

$$PMG = \int_0^{x_{20}} g(x) dx \quad (17)$$

Les parties hachurées de la figure 4 représentent ces fonctions.

De plus, il est possible de décomposer les variables KTF_i et KTG_i ; elles peuvent être exprimées de la façon suivante:

$$KTF_i = NRF_i \cdot VF_i \quad (18)$$

$$KTG_i = NRG_i \cdot VG_i \quad (19)$$

où NRF_i et NRG_i représentent le nombre de résidences des zones de faible et de grand courant d'une cellule hydroéconomique à l'année i . VF_i et VG_i représentent la valeur moyenne d'une résidence des zones de faible et de grand courant d'une cellule hydroéconomique à l'année i .

TABLEAU 2: Nombre de résidences affectées par les crues de
récurrence 20 et 100 ans.

<u>Municipalité</u>	<u>0-20</u>	<u>20-100</u>	<u>TOTAL</u>
Aylmer	28	46	74
Gatineau	564	315	879
Hull	0	1	1
Hull-Ouest	24	13	37
La Pêche	92	56	148
Masson	81	1	82
Pontiac	0	1	1

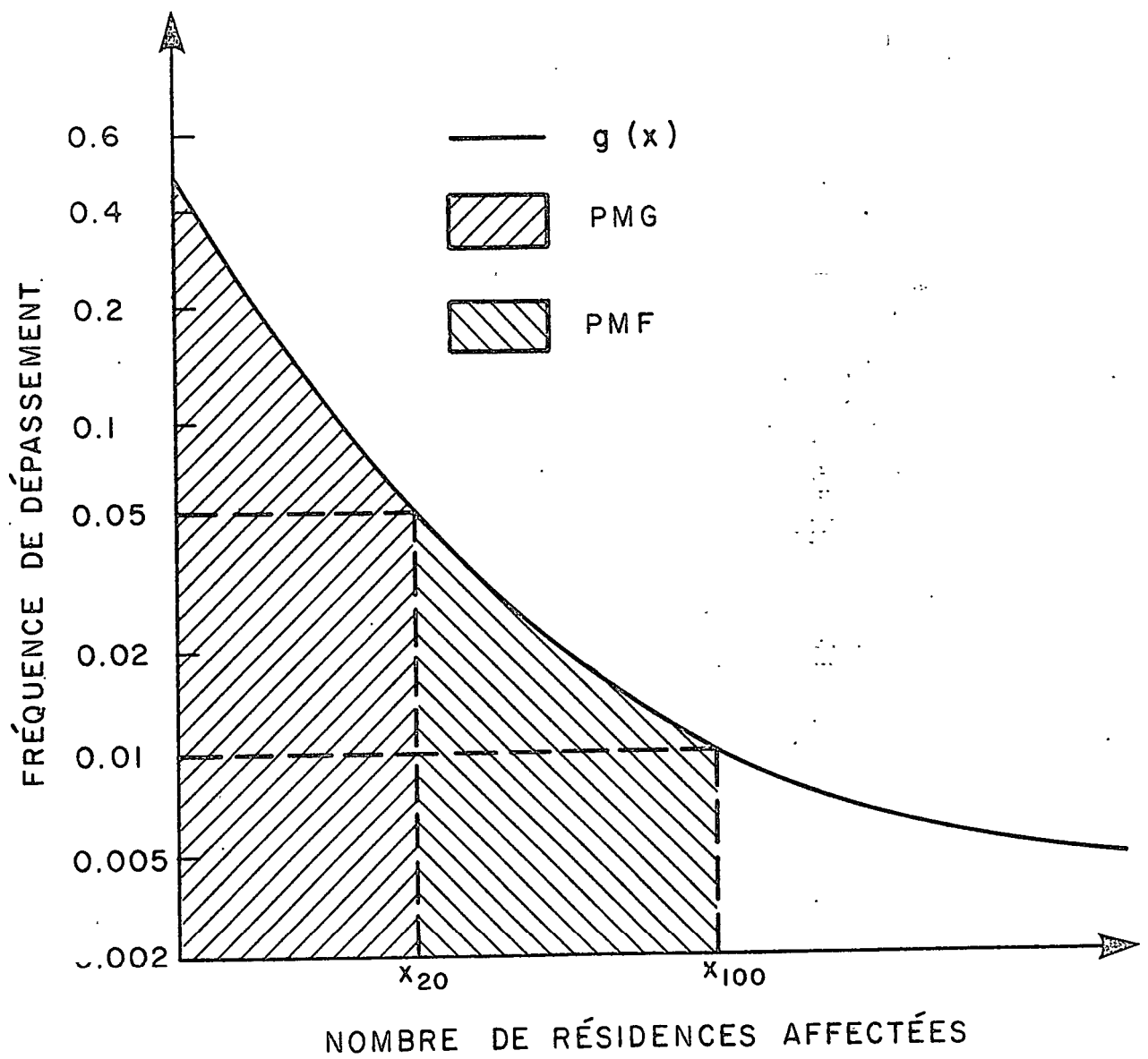


Figure 4 RELATION NOMBRE DE RÉSIDENCES AFFECTÉES—
FRÉQUENCE DE DÉPASSEMENT

Si l'on suppose que le nombre de résidences de la zone de faible courant croît à un rythme constant α_f , que le nombre de résidences de la zone de grand courant croît au rythme α_g , que la valeur moyenne d'une résidence de la zone de faible courant augmente au rythme β_f et que celle d'une résidence de la zone de grand courant augmente au rythme β_g , on a alors:

$$KTF = NRF_0 \cdot (1 + \alpha_f) \cdot VF_0 \cdot (1 + \beta_f) \quad (20)$$

$$KTG = NRG_0 \cdot (1 + \alpha_g) \cdot VG_0 \cdot (1 + \beta_g) \quad (21)$$

où NRF et NRG représentent le nombre de résidences des zones de faible et de grand courant d'une cellule hydroéconomique à l'année 0. VF et VG représentent la valeur moyenne d'une résidence des zones de faible et de grand courant d'une cellule hydroéconomique à l'année 0.

La relation (13) devient alors:

$$\sum_{i=1}^n \frac{DMA}{(1+r)^i} = [DUMAF \cdot PMF \cdot NRF_0 \cdot VF_0 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(1+\alpha_f)^i \cdot (1+\beta_f)^i}{(1+r)^i} \quad (22)$$

$$+ [DUMAG \cdot PMG \cdot NRG_0 \cdot VG_0 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(1+\alpha_g)^i \cdot (1+\beta_g)^i}{(1+r)^i}$$

où toutes les variables sont disponibles.

Comme on l'a déjà mentionné, le calcul des dommages moyens annuels est l'étape finale pour l'estimation des bénéfices relatifs aux solutions envisagées. Dans les deux prochaines sections, nous

présenterons comment l'équation (22) est utilisée pour estimer les dommages résiduels et les dommages du système régularisé suite à l'intervention de zonage appliquée dans la région de l'Outaouais.

2.6 Calcul des dommages résiduels.

Le calcul des dommages résiduels reliés à l'intervention de zonage se fait par l'estimation de la valeur du stock économique existant dans les zones désignées de chacune des cellules hydroéconomiques au début de la réglementation et de leur taux de croissance. Puisque l'intervention prohibe toute nouvelle construction dans ces zones, et sont nuls.

Le taux de croissance du capital économique est donc dans ce cas égal au taux d'augmentation de la valeur moyenne des résidences de ces zones.

La relation (22) devient alors pour le système régularisé:

$$\sum_{i=1}^n \frac{DMA_i}{(1+r)} = [DUMAF \cdot PMF \cdot NR_o \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(1+\beta_f)^i}{(1+r)^i}] + [DUMAG \cdot PMG \cdot NRG_o \cdot VG_o \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(1+\beta_g)^i}{(1+r)^i}] \quad (23)$$

*du est-ce
qu'il est
nul*

2.7 Calcul des dommages du système de base.

Dans cette section, nous devons simuler le taux de croissance économique qui aurait prévalu dans les zones désignées de chacune des unités économiques si la CRO n'avait pas appliqué la réglementation de zonage. Il faut alors poser une hypothèse concernant ce développement économique. Trois différentes situations seront considérées:

- i) le taux de croissance économique d'une région désignée serait le même que celui de la région non-désignée pour chacune des cellules hydroéconomiques;
- ii) le taux de croissance économique d'une région rurale désignée serait le même que celui de l'ensemble des municipalités rurales de la CRO et le taux de croissance économique d'une région urbaine désignée serait le même que celui de l'ensemble des municipalités urbaines de la CRO;
- iii) le taux de croissance économique des zones désignées serait le même que celui de la CRO dans son ensemble.

IL sera dès lors possible de déterminer les variables et utilisées dans l'équation (22) et de calculer les dommages moyens annuels du système de base par cette équation.

2.8 Analyse bénéfices-coûts.

~~La différence entre les dommages moyens annuels du système de~~
~~base et du système régularisé constitue les bénéfices reliés à~~
~~l'intervention.~~

Dès lors, nous pouvons compiler les bénéfices et les coûts et les répartir sur trois niveaux de population:

- propriétaires des plaines inondables;
- municipalités concernées;
- gouvernements provincial et fédéral.

Nous pourrions alors déterminer qui sont les bénéficiaires et qui supportent les coûts de l'intervention de zonage.

BIBLIOGRAPHIE

- Bureau de la Statistique du Québec, Perspectives démographiques régionales, 1981-2006, Juin 1984, 436p.
- Comité de planification de la régularisation de la rivière des Outaouais, Rapport final, Déc. 1980, 96p.
- CRAR, Evaluation des dommages causés par les inondations en 1976 a divers niveaux d'élévation des eaux de la rivière Richelieu et de la baie Missisquoi, Haut-Richelieu, Québec, Univ. de Sherbrooke, 210p.
- Dantzig, D.V., (1956), Economic Decision Problems for Flood Prevention, *Econometrica*, Vol.24, no3, pp276-287.
- El-Jabi, N., (1980), Approche systématique pour l'aménagement des plaines inondables, Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique de Montréal, 263p.
- El-Jabi, N., Richard, D. et Rousselle, J., (1981), Aspect financier du processus crue-dommage, *Eau du Québec*, vol.14 no4, p345-351.
- El-Jabi, N., Carpentier A. et Ceccaldi, X., L'hydrométrie du projet Archipel de Montréal, *Sciences et Techniques de l'Eau*, vol.17, no2, pp135-138.

GREMU, Estimation des dommages moyens causés par les inondations,
Rapport final, Janvier 1981, 77p.

Grigg, N.S., Helweg, O.J., (1975), State-of-the-Art of Estimating
Flood Damage in urban areas, Water Resources Bulletin, Vol.11,
no2., pp379-390.

Ouellette, P., (1982) Analyse des dommages d'inondation par la théorie
des valeurs extremes, Mémoire de maitrise, Ecole Polytechnique de
Montréal, 197p.

Ouellette, P., El-Jabi, N. et Rousselle, J., (1984) Application of
Extreme value theory to flood damage, Article soumis à l'ASCE.

Richard, D., (1981), Analyse comparative des modes de controle des
inondations, Mémoire de maitrise, Ecole Polytechnique de Montréal,
197p.

Rousselle, J., (1972), On some Problems of Flood Analysis, Ph.D. Thesis,
Colorado State Univ., 226p.

Todorovic, P., (1970), On some Problems Involving Random Number of
Random Variables, Ann. Math. Statis., vol.41, no3, pp.1059-1063.

Zelenhasic, E., (1970), Theorotical Probability Distributions for Flood
Peaks, Colorado State Univ., Hydrol. Paper, no42, 35p.

ANNEXE "A"

DESCRIPTION DU PROJET

Voici les différentes étapes du projet:

-Une revue de littérature a été effectuée. Elle a permis d'étudier divers travaux faits sur le sujet et aussi de découvrir qu'il n'existe dans la littérature aucun modèle semblable à celui que nous utilisons.

-Nous avons rencontré les différentes personnes impliquées de près ou de loin dans le projet:

-d'Environnement Canada:

-Jean-Yves Pelletier.

-du Ministère de l'Environnement du Québec:

-Pierre Larouche

-Jacques Déziel.

-de la Communauté régionale de l'Outaouais:

-Jacques Perrier (développement municipal)

-Jacques Tremblay (évaluation municipale)

-Nous avons élaboré un plan de travail. Celui-ci est bien expliqué par le document que nous présentons.

-Nous avons effectué une cueillette des données nécessaires à l'estimation des dommages causés par les inondations.

-données économiques:

-Statistique Canada (Montréal et Ottawa);

- Ministère des Affaires Municipales du Québec;
- Communauté régionale de l'Outaouais;
- données hydrologiques:
 - Ministère de l'Environnement du Québec;
 - Environnement Canada.

Il reste à terminer les étapes suivantes:

- calculs:
 - les différents programmes informatiques que nous utiliserons sont maintenant au point.
 - il ne reste plus qu'à traiter les données (25% de ce travail est achevé).
- élaboration des résultats:
 - évidemment, cette étape n'est pas amorcée.
- rédaction:
 - 20% de ce travail est complété.

