

Record Number: 440
Author, Monographic: Meybeck, M.
Author Role:
Title, Monographic: L'érosion et la qualité de l'eau au Québec
Translated Title:
Reprint Status:
Edition:
Author, Subsidiary:
Author Role:
Place of Publication: Québec
Publisher Name: INRS-Eau
Date of Publication: 1972
Original Publication Date:
Volume Identification:
Extent of Work: 45
Packaging Method: pages
Series Editor:
Series Editor Role:
Series Title: INRS-Eau, Rapport de recherche
Series Volume ID: 44
Location/URL:
ISBN: 2-89146-020-0
Notes: Rapport annuel 1971-1972
Abstract: 10.00\$
Call Number: R000044
Keywords: rapport/ ok/ dl

L'érosion et la qualité de l'eau au Québec

INRS-Eau
UNIVERSITE DU QUEBEC
C.P. 7500, Sainte-Foy
Québec G1V 4C7

RAPPORT SCIENTIFIQUE No 44
1972

Rapport rédigé pour
INRS-Eau

par
M. Meybeck

ISBN 2-89146-020-0

DEPOT LEGAL 1972

Tous droits de traduction, de reproduction et d'adaptation réservés

© 1972 - Institut national de la recherche scientifique

L'érosion et la qualité de l'eau au Québec

Michel Meybeck Novembre 1972

	Page
1- <u>PHENOMENOLOGIE</u>	1
a) Définitions	1
b) Intérêt des études d'érosion	1
c) Phénoménologie de l'érosion	3
(i) agents d'érosion	3
(ii) facteurs d'érosion	3
d) Transport des matériaux d'érosion par les eaux	8
(i) transport des matériaux solides	8
(ii) transport des matériaux dissous	9
e) Paramètres mesurables de l'érosion, domaine de variation	11
2- <u>LA QUALITE NATURELLE DE L'EAU DANS LES CONDITIONS QUEBECOISES</u>	13
a) Facteurs externes de l'érosion	13
(i) climat	13
(ii) végétation	15
(iii) relief	16
b) Facteurs géologiques de l'érosion	17
(i) lithologie	17
(ii) hydrogéologie	18
c) Erosion globale au Québec	20
d) Eléments dissous majeurs - Provinces géochimiques	22
(i) qualité des précipitations	22
(ii) provinces géochimiques	25

(iii)	relation conductivités - concentrations	27
(iiii)	variations des concentrations élémentaires	27
3-	<u>ECHANTILLONNAGE ET MESURE DES PARAMETRES</u>	29
a)	Choix des paramètres	29
b)	Echantillonnage	31
c)	Mesure	32
4-	<u>TRAITEMENT DES DONNEES</u>	33
a)	Analyse statistique	33
b)	Bilans	36

Figures

- 1- Température et précipitation moyennes annuelles au Québec
- 2- Longueur de la saison sans gel et fraction nivale des précipitations au Québec
- 3- Déficit annuel d'écoulement au Québec
- 4- Végétation du Québec
- 5- Géologie du Québec
- 6- Rivière Eaton - Relation conductivité journalière - débit 1969
- 7- Rivière Eaton - Relation bicarbonates - débit (composites) 1969
- 8- Rivière Eaton - Relation conductivité - débit: cycles de crues 1968

Tableaux

- | | | |
|-----|---|---------|
| I | Caractères physiographiques des bassins étudiés | |
| II | Concentrations moyennes des rivières du Québec 1969 | |
| IV | Concentration moyenne annuelle: pourcentage des différents éléments | |
| V | Relations conductivités - concentrations | |
| VI | Données climatiques au Québec | Page 14 |
| VII | Transports dissous en Finlande | Page 24 |

L'érosion et la qualité de l'eau au Québec

1. PHENOMENOLOGIE

a) Quelques définitions

dénudation: Abaissement du relief par l'érosion ou par la perte
(denudation) de masse (mass-wasting). Son complément est le dépôt ou la sédimentation. Ces deux phénomènes représentent les phases exogéniques fondamentales du cycle géologique. On exprime la dénudation en mm/1000 ans.

érosion: L'érosion est le processus, la dénudation la conséquence
(erosion) mise en mouvement par les agents géologiques des débris de roches et de la matière organique associée. L'érosion implique un transport. On exprime l'érosion en $t/km^2/an$.

altération: Réponse spontanée et irréversible des roches aux con-
(weathering) ditions de la surface terrestre; désintégration physique et décomposition chimique qui transforment le rocher en matériaux clastiques, colloïdaux et solubles.

perte de masse: Mouvement de matériaux de la surface terrestre sous
(mass-wasting l'action de la gravité. Citons comme exemple les
et mass move- glissements de terrains, avalanches rocheuses, coulées
ment) de boue etc...

b) Intérêt des études d'érosion

On peut distinguer principalement quatre avantages à de telles

études:

- géomorphologie: L'érosion est le principal agent responsable de la forme des paysages (Exemple: au Québec la morphologie est souvent de type glaciaire et péri-glaciaire).
- géochimie - géologie: Nous avons vu que l'érosion et son pendant, la sédimentation, sont des phénomènes géologiques essentiels. Par exemple, l'étude de l'érosion permet d'établir les bilans des apports aux océans, c'est-à-dire le cycle des éléments chimiques. L'étude de la dénudation actuelle est d'un grand intérêt pour la reconstitution des massifs montagneux, les orogénèses etc...
- environnement - conservation des sols: C'est la raison de la grande majorité des études d'érosion particulièrement dans les pays semi-arides.
- qualité de l'eau: L'eau est le principal agent de l'érosion et de loin le facteur de transport le plus important par trois processus: minéraux, fragments de roche et matière organique en suspension, salta-tion et traction sur le fond; sels, minéraux et matière organique en solution.

Aussi ce sont les produits de l'érosion qui vont déterminer la qualité naturelle de l'eau, c'est pourquoi une étude des rapports qualité - érosion est essentielle.

c) La phénoménologie de l'érosion(i) agents d'érosion

Les agents de l'érosion sont multiples. L'eau est le principal car ce matériau agit en même temps comme agent d'altération (désintégration physique par alternance gel - dégel; décomposition chimique par dissolution, hydrolyse, échange d'ion, néo-formation de minéral) et comme agent de transport. La glace a un pouvoir d'érosion mécanique énorme dans certaines conditions (glaciers de type alpins). Le vent a un pouvoir d'érosion faible, son pouvoir de transport est également limité aux particules de faibles diamètres (0.02 à 0.07 mm en suspension, 0.15 à 0.3 mm en saltation, quelques cm en roulage). Enfin la perte de masse sous l'action de la gravité peut être importante dans certaines régions. Citons enfin les agents biologiques (plantes, animaux) peu importants jusqu'à l'arrivée de l'homme.

Nous ne nous intéresserons ici qu'à l'eau qui est le principal agent d'érosion au Québec, et qui en général transporte les matériaux libérés par l'action des autres agents notamment par la "perte de masse".

(ii) facteurs d'érosion

L'action des principaux agents d'érosion est déterminée par les facteurs de l'érosion, ceux-ci sont à classer en trois groupes.

-les facteurs externes: climat, végétation, relief.

-facteurs géologiques: lithologie, degré de fracturation et de fissuration.

-facteurs minéralogiques et chimiques: propriétés chimiques des minéraux et des éléments (exemple: dissolution de la calcite et de l'aragonite, équilibre des carbonates en solution).

De plus il faut faire intervenir également le facteur temps et l'histoire antérieure des terrains. Ainsi au Québec, l'érosion glaciaire a complètement décapé la partie altérée des roches: en dessous du sol organique la roche sous-jacente est généralement très saine. A l'opposé dans les pays tropicaux où l'altération chimique peut atteindre des profondeurs énormes (quelques dizaines de mètres), les éléments les plus solubles sont déjà partis depuis longtemps, l'érosion par dissolution est alors très faible.

Enfin quand on veut avoir la part réelle de l'érosion avec des bilans de matières transportées il faut effectuer deux corrections:

-soustraire les apports des précipitations (sèches et humides). Ces apports peuvent être très importants surtout dans les régions où les eaux sont faiblement minéralisées (cas du Québec). Il s'agit essentiellement de Cl (provenance marine par aérosols), du soufre (provenance volcanique, et actuellement pollution), du Ca, Na, K (provenance marine et poussières) et des bicarbonates (CO_2 de l'air et pollution). De plus les précipitations peuvent avoir une action érosive chimique plus ou moins grande suivant leur composition notamment en SO_4^{--} et HCO_3^- .

-soustraire l'effet anthropique. Cette influence est très importante à la fois sur l'érosion du type détritique par déforestation, mise en culture, excavations etc..., et sur les transports en solution par rejets directs aux rivières. L'exemple type est celui des Grands Lacs: d'après BEETON (1965) en 60 ans dans le lac Huron SO_4^{--} passe de 7 mg/l à 15 mg/l, dans le lac Ontario Ca^{++} passe de 30 mg/l à 38 mg/l et Cl^- de 7 mg/l à 25 mg/l. On voit bien que la composition actuelle du St Laurent n'est qu'un reflet lointain des phénomènes naturels. L'étude de l'érosion est donc extrêmement complexe puisqu'elle dépend du matériel érodible, de l'agent d'érosion et de l'agent de transport. Néanmoins la plupart des études récentes

montrent que les facteurs principaux d'érosion sont le climat, le relief et en dernier lieu la géologie.

-Le climat contrôle la pluviométrie et la température, deux paramètres essentiels. FOURNIER (1960) a directement relié l'érosion détritique au rapport $\frac{p^2}{P}$ où p est la pluviométrie du mois le plus plu-

vieux et P la hauteur d'eau totale annuelle. Ainsi les pays semi-arides et méditerranéens ont-ils un climat très érosif. D'après SCHUMM (1964) l'érosion augmente avec la température, toutes choses égales ailleurs, en effet le rôle du relief vient perturber cette affirmation. Cela s'explique notamment par le fait que les terrains sont protégés des actions érosives directes par la couverture de neige. Dans les pays encore plus froids où le pergélisol existe (climat subarctique et arctique) le sol gelé en permanence est particulièrement protégé, notamment contre la dissolution, les actions érosives sont limitées aux phénomènes de solifluction etc...

-Le relief est un facteur déterminant, ce qui compte étant surtout les pentes, dénivellation etc... et non pas l'altitude.

SCHUMM (1954) a défini un coefficient de relief (relief ratio) comme le rapport $\frac{A_m - A_0}{L}$ où A_m est l'altitude maximale du bassin,

A_0 l'altitude minimale, et L la longueur du cours d'eau. L'érosion détritique E_d ($t/km^2/an$) vaut alors: a et b sont des coefficients.

$$E_d = \exp \left[a \left(\frac{A_m - A_0}{L} \right) + b \right]$$

FOURNIER (1960) définit un coefficient orographique $\frac{H^2}{S}$ où

H est la "hauteur moyenne du relief" c'est-à-dire l'altitude moyenne de la courbe hypsométrique moins l'altitude de l'émissaire, et S est la surface du bassin.

$$\frac{H^2}{S} < 6 \quad \text{faible relief}$$

$$\frac{H^2}{S} > 6 \quad \text{fort relief}$$

FOURNIER arrive ainsi à la relation suivante:

$$\log E_d = m \log p^2/P + n \log H^2/S + u$$

Plus récemment ANHERT (1970) a trouvé une relation linéaire entre l'érosion totale E_t (exprimée ici en dénudation) et le "relief moyen" h (mean relief) défini comme "la moyenne du relief mesuré dans des surfaces régulièrement espacées". Pour des rivières de même climat on aurait donc:

$$E_t = a h - b$$

On voit que le relief est donc un facteur essentiel de l'érosion même si la corrélation est encore mal définie.

-La composition géologique des roches n'intervient donc pas du tout dans ces études, à cela plusieurs raisons: Fournier par exemple ne fait pas intervenir le transport dissous, et il choisit des bassins versants assez grands ($>2000 \text{ km}^2$) qui ont des compositions

lithologiques variées. Mais surtout dans la plupart des climats la roche est protégée de l'action érosive directe par une couverture végétale qui joue un grand rôle. Néanmoins, il est évident que les roches ont des propriétés très variables vis-à-vis de l'érosion. Par rapport à l'érosion détritique les roches les plus érodibles sont celles qui ont le moins de cohésion comme les loess (dépôts argileux éoliens), les argiles, les marnes, schistes, les sédiments quaternaires glaciaires et fluvio-glaciaires peu consolidés; à l'opposé se situent les roches cristallines et certaines roches métamorphiques. Par rapport à l'érosion chimique les roches les plus vulnérables sont celles qui contiennent des minéraux très solubles ou facilement hydrolysables comme: calcite, dolomite, gypse, anhydrite, hæmatite, goethite, pyrite, c'est-à-dire les roches sédimentaires carbonatées (calcaires, dolomies), salines, ou riches en fer. Rappelons que ces propriétés n'auront d'effet que si les agents d'érosion et de transport sont puissants et la protection des terrains faibles. Ainsi un dépôt de marnes recouvert de forêts et pour des pentes faibles sera très peu érodé, de même des bassins calcaires horizontaux, moyennement drainés (Bassin Parisien) seront faiblement érodés par dissolution par rapport à des massifs calcaires de type subalpin.

Une autre propriété importante des roches est leur perméabilité; dans les régions où les roches ont une perméabilité d'origine (grès) ou acquise (calcaire fissuré, granites fracturés) les eaux souterraines abondantes seront en contact beaucoup plus étroit et plus long avec les formations aquifères et seront donc plus chargées que les eaux de surface. L'érosion chimique sera forte dans la mesure où la circulation de ces eaux sera importante (sources, résurgences etc...). Dans le cas d'eaux souterraines profondes circulant peu (les temps de séjour sont couramment de l'ordre de 1000 ans) l'érosion par les eaux souterraines restera faible puisque le transport est restreint.

d) Le transport des matériaux d'érosion par les eaux

Nous distinguons essentiellement deux types de matériaux transportés: les matériaux sous forme dissoute et les matériaux sous forme particulaire. La distinction est quelquefois difficile à faire au niveau des colloïdes, on convient alors d'appeler dissous toute la matière traversant les filtres les plus fins (quelques 1/10 de microns actuellement) (LIVINGSTONE, 1963).

(i) Transport des matériaux solides

Deux approches peuvent être menées à ce niveau: l'approche déterministe relève de l'hydraulique, le mouvement des particules transportées est alors fonction de leur diamètre, densité, vitesse d'écoulement du fluide, etc... Il ressort de toutes ces études que la vitesse d'écoulement est le facteur principal régissant la turbidité. Cette approche est traitée en détail par le Task Committee on Preparation of Sedimentation Manual qui publie ses résultats dans le journal de l'Am. Soc. of Civil Eng. L'autre approche est empirique et consiste essentiellement à relier la quantité transportée au débit.

Il y a trois modes de transport hydraulique: la suspension, la saltation, et la reptation ou le roulage. Les deux derniers composent le charriage de fond (bed load). Généralement la partie transportée sur le fond est beaucoup plus faible, de toutes façons on s'intéresse la plupart du temps au transport en suspension relativement plus facile à mesurer, se contentant d'estimer le charriage. Pour le Mississippi par exemple on estime le charriage de 7 à 10% du transport solide total (FAIRBRIDGE, 1968).

Nous nous limiterons ici à l'approche déterministe du transport solide en suspension. D'une façon très générale la turbidité C_s est liée au débit Q_λ par la relation:

$$C_s = a Q_\lambda^b$$

a et b sont deux coefficients: a rend compte de la turbidité générale de la rivière et b ($b > 0$) de l'augmentation de la capacité de transport avec le débit. Cette relation est universelle (MULLER et FORSTNER 1968).

On voit donc que le transport est exacerbé par le débit, c'est la caractéristique essentielle du transport en suspension, il en résulte que les basses eaux n'auront qu'une très faible turbidité et que la majeure partie du transport se fera lors des crues.

Une autre caractéristique du transport en suspension est l'existence de cycles d'hystérésis: la turbidité est généralement plus forte à débit égal en montée des eaux qu'en décrue. Le pic de turbidité a lieu aux deux tiers de la montée des eaux.

Le transport solide est donc irrégulier, discontinu, et qu'il est très affecté par des phénomènes rares à l'échelle humaine mais courant à l'échelle géologique (glissements de terrains, crues centenaires...). De plus l'estimation de l'érosion par le transport solide est toujours effectuée par défaut en effet dès que la vitesse de l'eau diminue en dessous d'un seuil il y a dépôt, par exemple dans les lacs, retenues, réservoirs etc.: le transport solide est très souvent partiel.

(ii) Transport des matériaux dissous

Nous avons déjà traité du transport des sels minéraux en détail (MEYBECK 1972), rappelons-en les principaux points. La concentration globale ou salinité S [$M L^{-3}$] ainsi que la concentration des principaux ions majeurs (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{--} , HCO_3^-) varient généralement avec le débit suivant une loi

$$S = a' Q_{\ell}^{b'}$$

a' et b' sont deux coefficients: a' rend compte de la minéralisation générale de la rivière et b' exprime la différence de concentration entre les eaux de surfaces et les eaux souterraines ($b' < 0$). Généralement $|b'| < 1/3$, mais pour des régions semi-arides ou en présence de sources salines, les variations de concentrations peuvent être très fortes, en ce cas $|b'| > 1$ et les apports dissous les plus importants sont fournis alors par les débits faibles.

Le transport dissous est donc freiné par le débit, c'est un phénomène continu et beaucoup plus régulier que le transport solide. De plus dans la plupart des cas (i.e. s'il n'y a pas évaporation ou précipitation) le transport dissous est total.

Notons que chaque élément a un coefficient b' qui lui est propre, aussi les rapports entre les éléments pourront être fonction du débit. Rappelons également qu'il existe des cycles annuels, des cycles de crues ainsi que des variations totalement indépendantes du débit, c'est notamment le cas pour les éléments mineurs nutritifs (NO_3^- , PO_4^{3-}).

A notre connaissance peu de travaux ont abordé le mode de transport des matières organiques dissoutes. Pourtant dans certaines rivières (Amazone, rivières sibériennes) cet aspect est essentiel, ALEKIN et BRAZHNKOVA estiment à 20% la partie de matière dissoute transportée en URSS sous forme organique, particulièrement en Sibérie dont les caractères généraux sont très proches de ceux du Québec.

e) Les paramètres mesurables de l'érosion et leur domaine de variation.

Dans le cas qui nous préoccupe on s'intéressera seulement aux

produits de l'érosion transportés par l'eau. Le charriage de fond sera traité à part. Deux paramètres peuvent être mesurés couramment: la turbidité et la salinité.

-La turbidité peut se mesurer de façon discontinue par prélèvements multiples sur la section intéressée, filtration et pesée (gravimétrie), ou d'une façon continue par néphélémétrie (absorption de la lumière émise par une source), transmission nucléaire (absorption ou diffusion du rayonnement gamma émis par une source), et par radioactivité naturelle (mesure de la radioactivité gamma émise par les particules en suspension). Tandis que la méthode gravimétrique intègre toute la section de la rivière à un instant donné, les méthodes continues sont essentiellement ponctuelles.

-La salinité S peut être facilement estimée par la mesure en continu de la conductivité X. En effet on a généralement la relation suivante:

$$S = m X + l$$

La plupart des ions majeurs, surtout si les concentrations sont élevées, sont également reliés à la conductivité:

$$C_i = u X + v$$

Une bonne calibration préliminaire pour chaque rivière permettra donc d'obtenir avec une erreur réduite la salinité et certains éléments avec la conductivité.

A l'échelle mondiale les gammes de variations des turbidités et salinités moyennes annuelles (masse annuelle transportée/volume d'eau annuel) sont les suivantes:

-turbidité: C_s de 2 mg/l à 16 000 mg/l. La borne inférieure est atteinte pour les rivières d'Amazonie et de Finlande (LAAKSONEN 1971) la borne supérieure pour des rivières drainant des glaciers alpins. A l'échelle du globe on pourrait tenter la classification suivante:

	$C_s < 10 \text{ mg/l}$	rivières très peu turbides
10	$< C_s < 100$	rivières peu turbides
100	$< C_s < 1000$	rivières de turbidité moyenne
1000	$< C_s < 10000$	rivières très turbides
10000	$< C_s$	rivières extrêmement turbides

-salinité: S de 5 mg/l à 10 000 mg/l. De nouveau la borne inférieure correspond aux rivières d'Amazonie, la borne supérieure correspond aux rivières des zones semi-arides (Pecos River, Texas). On peut proposer une classification analogue à la précédente.

	$S < 10 \text{ mg/l}$	rivières très peu minéralisées
10	$< S < 100$	rivières peu minéralisées
100	$< S < 1000$	rivières de minéralisation moyenne
1000	$< S < 10000$	rivières très minéralisées

La salinité est généralement reliée au débit spécifique $[L T^{-1}]$ des rivières à très faible débit spécifique ($< 0.1 \text{ l/s/km}^2$) seront toujours très minéralisées. Inversement les faibles minéra-

lisations sont atteintes pour les forts écoulements ($> 20 \text{ l/s/km}^2$), ceci à relief égal.

Il est évident que les valeurs instantanées peuvent être plus fortes: lors des crues, les turbidités sont facilement 10 fois supérieures aux valeurs moyennes annuelles, tandis que lors des étiages, les salinités peuvent valoir 4 ou 5 fois la moyenne.

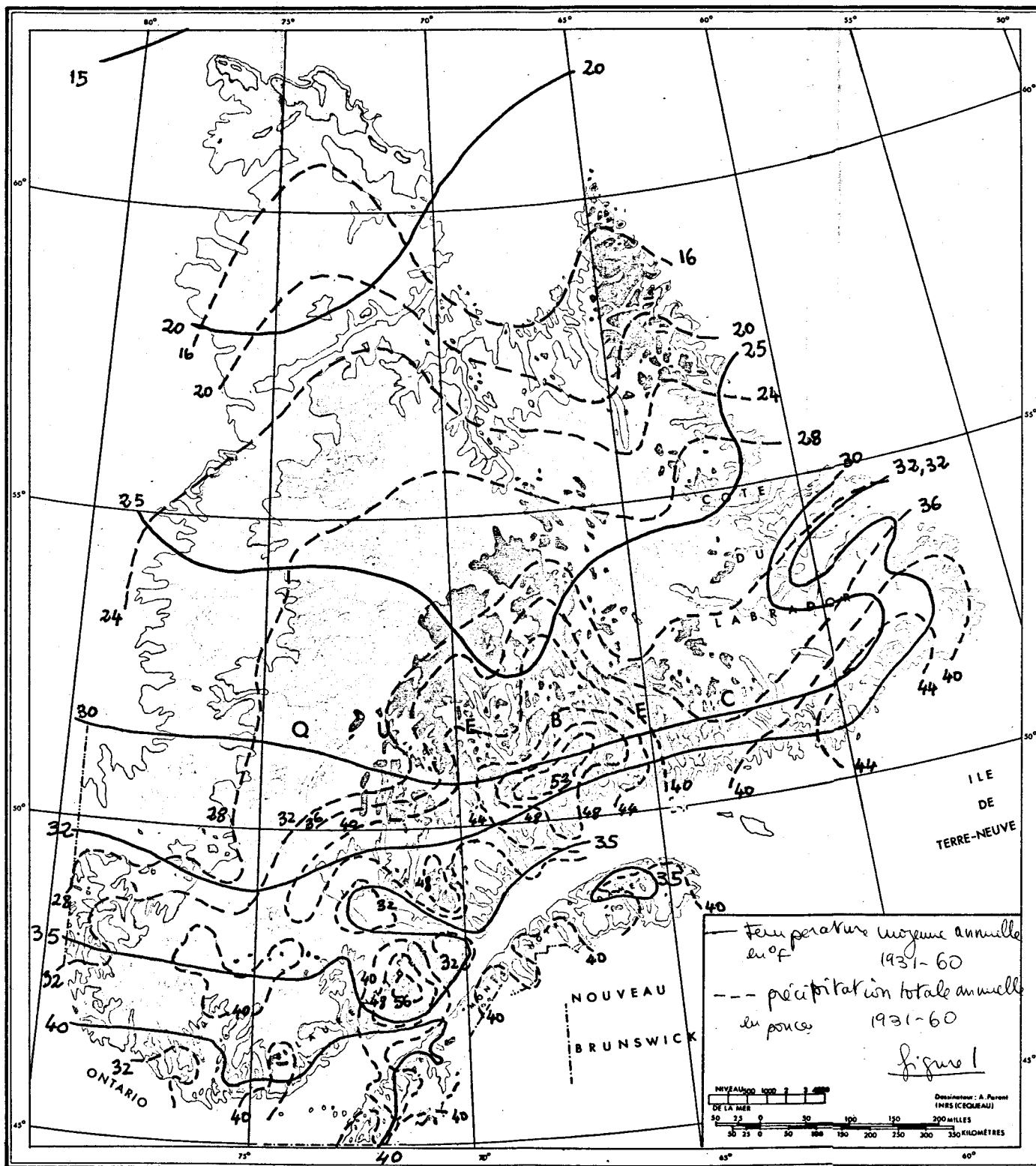
2. LA QUALITE NATURELLE DE L'EAU DANS LES CONDITIONS QUEBECOISES

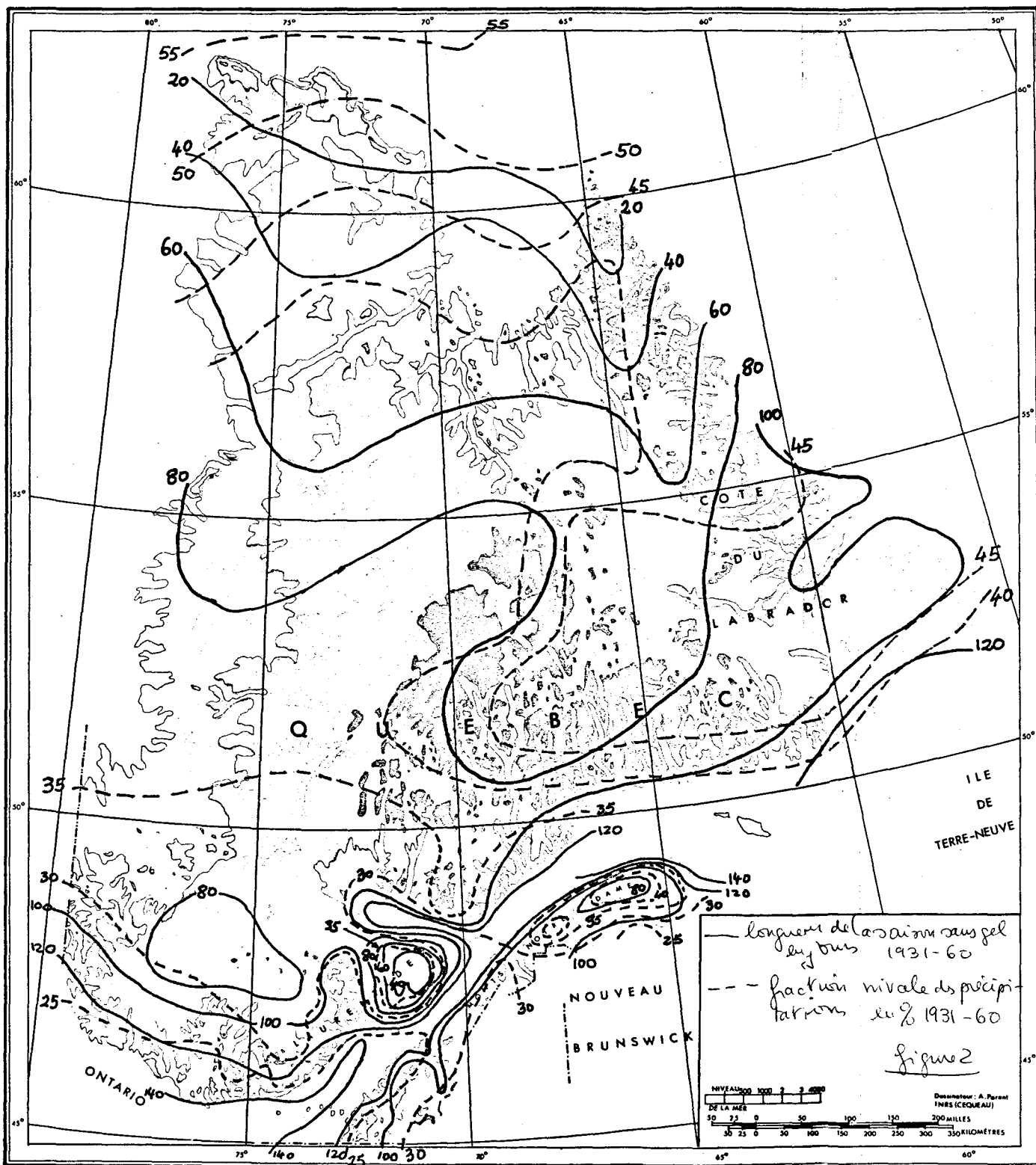
a) Les facteurs externes de l'érosion

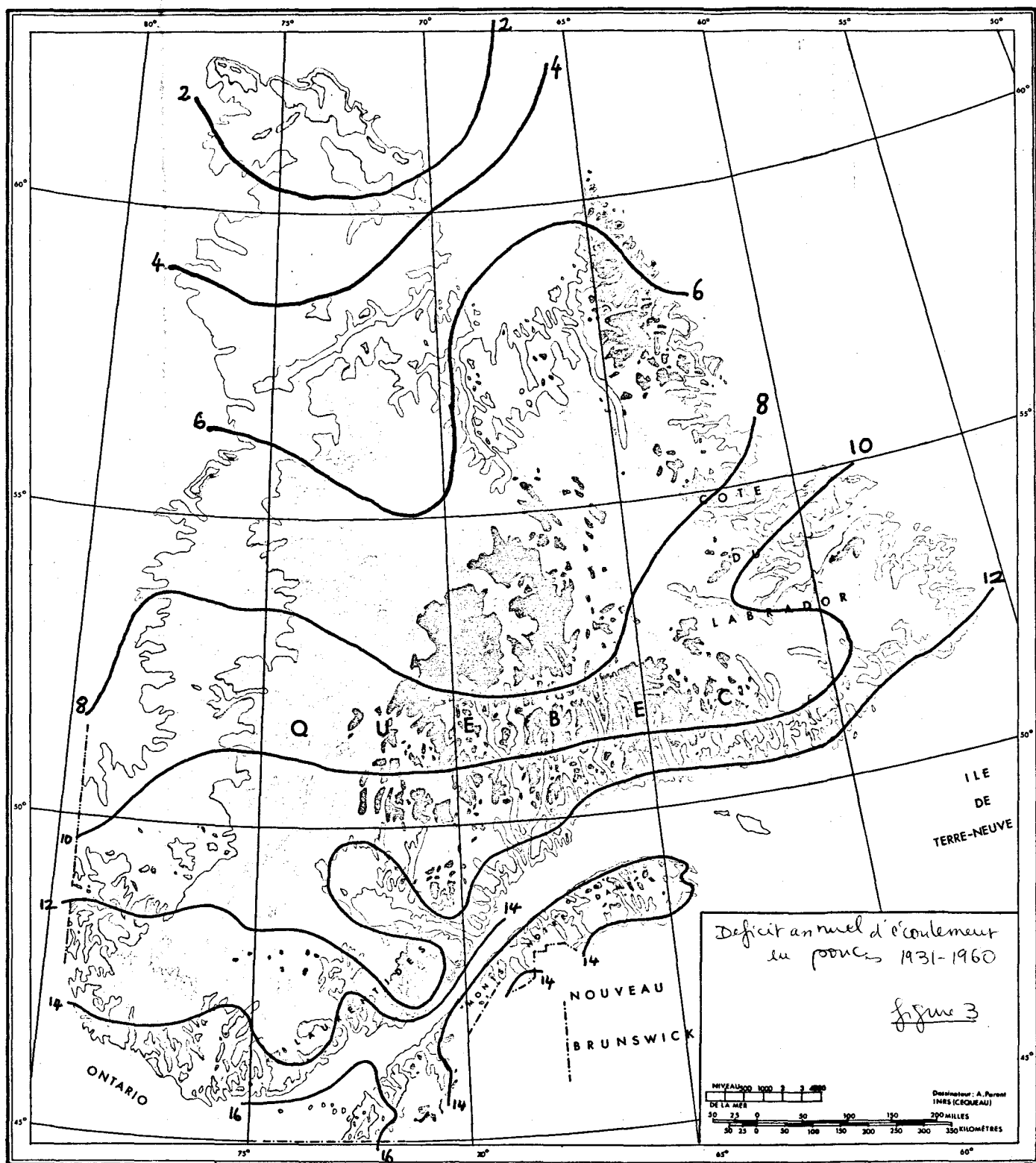
(i) Climat (figures 1, 2, 3)

Il y a trois principaux types de climat au Québec: climat continental humide (Cantons de l'Est, Terres Basses), climat subarctique (Gaspésie, Bouclier Canadien jusqu'à 55° N) et climat arctique à partir du 55° N.

Il y a un effet de relief certain: à latitudes égales les Laurentides et les Monts Chicchocs ont un climat plus froid et plus humide. Aussi peut-on distinguer au Québec 6 zones climatiques: Terres Basses, Cantons de l'Est et Beauce; Laurentides et Monts Chicchocs, Abitibi et Saguenay, zone 50° N à 55° N, zone 55° N - 60° N et enfin la zone du Nouveau Québec après le 60° N. Le tableau suivant résume les principaux caractères de ces régions (FERLAND et GAGNON 1967).







	Cantons Est Basses Ter- res	Laurentides Gaspésie*	Abitibi Saguenay	50-55° N	55-60° N	Nouveau Québec
température annuelle °F	40	32-35*	32	27	23	18
" moyenne Janvier °F	12.5	5	0	-7	-10	-12
" " Juillet °F	100	95	95	58	50	43
dernière gelée printemps	15 Mai	1 Juillet	15 Juin	15 Juin	30 Juin	30 Juin
première gelée automne	1 Octobre	15 Août-1 Sept.*	1 Sept.	1 Sept.	20 Août	1 Août
saison sans gel jours	140	40-80*	80	80	50	20
précipitation annuelle pouce	40	56-40*	40	30	22	14
hauteur neige " pouce	100	190	120	110	90	70
déficit écoulement pouce	16	12	12	8	5	2

Tableau VI Données climatiques

Les températures sont très basses et au dessus du 55° N le pergélisol est discontinu, au dessus du 60° N il est continu (figure 1).

Les précipitations diminuent fortement vers le Nord. Leur répartition annuelle est variable: près des côtes (estuaire du St Laurent) et dans les Terres Basses, elles sont réparties régulièrement, mais à Nitchequon on a un maximum très net en été.

La couverture de neige joue un grand rôle en protégeant le sol des actions érosives. La longueur de la saison sans gel varie de 140 j. pour les Basses Terres à 20 jours au Nouveau Québec. Les journées d'alternance de gel et dégel qui augmentent la désintégration physique des roches sont réduites au début et à la fin de l'hiver.

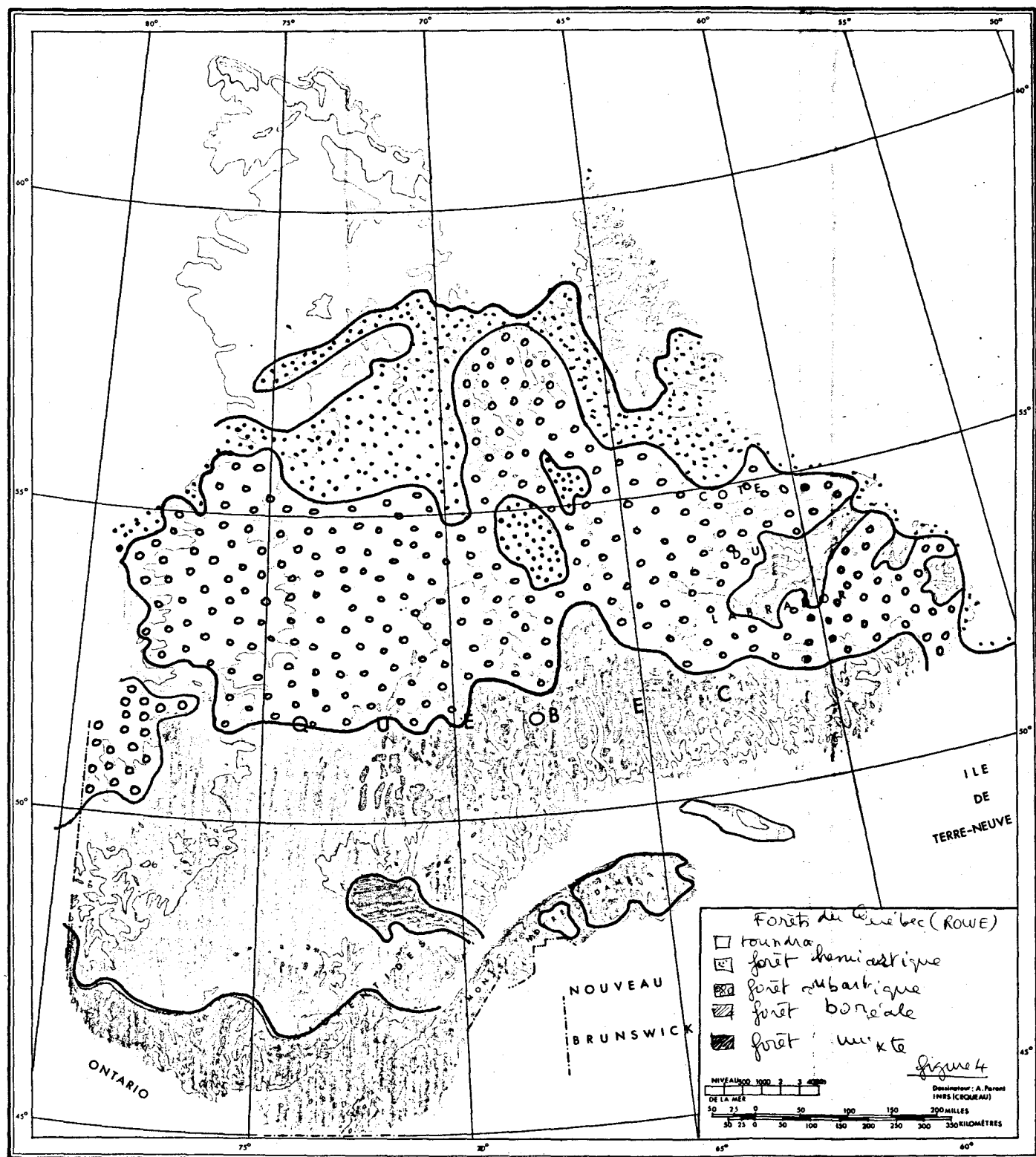
(ii) Végétation (figure 4)

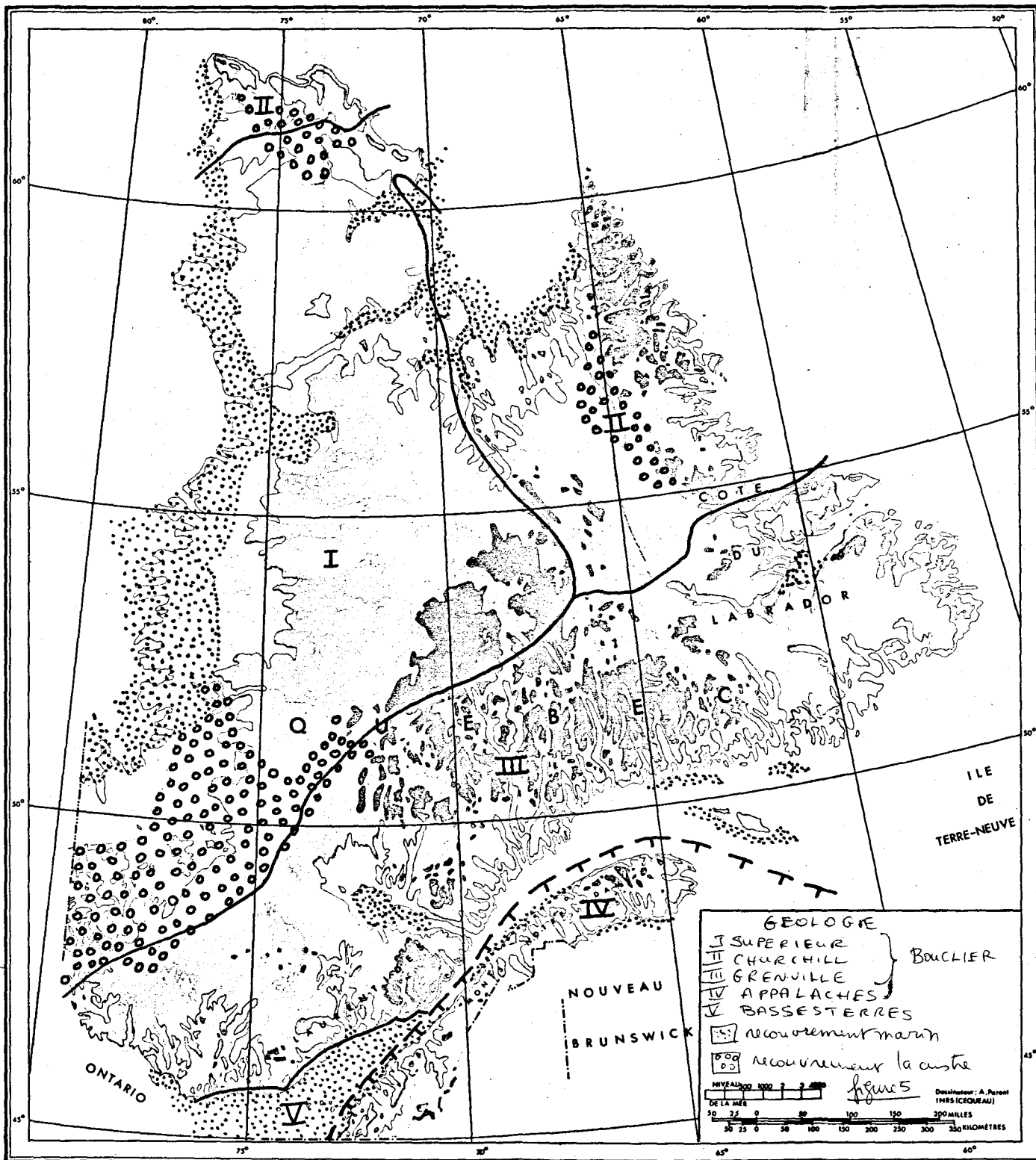
Mise à part la toundra, on peut distinguer 4 zones forestières principales au Québec (ROWE 1959):

-forêt mixte: feuillus et conifères. Les essences les plus communes varient de l'Agatineau au la Témiscouata (mais il y a généralement les érables (*acer saccharum*, *acer rubrum*) le bouleau (*betula lutea*), peuplier (*populus grandidentata*), le chêne (*quercus rubra*). Les conifères les plus communs sont le tsuga (*tsuga canadensis*), le pin blanc (*pinus strobus*), l'épinette (*picea glauca*) et le sapin (*abies balsamea*).

-forêt boréale: essentiellement constituée de conifères: épinettes (*picea glauca*, *p. mariana*), sapin (*abies balsamea*), pin (*pinus strobus*, *p. banksiana*). Mais on trouve encore du bouleau (*betula lutea*, *b. papyrifera*) et de l'érable (*acer saccharum*), voir du

ROWE J





peuplier (*populus trémuloides*, *p. balsamifera*).

-forêt subarctique: forêt clairsemée, le sol est couvert de lichens, les hauteurs sont nues. La principale espèce est l'épinette noire (*picea mariana*), associée avec l'épinette grise (*picea glauca*) et le sapin (*abies balsamea*). Peupliers et bouleaux sont très localisés. Dans la région de Fort George c'est le pin qui domine (*pinus banksiana*).

-forêt - toundra ou forêt hémiarctique: C'est la transition entre la forêt subarctique et la toundra. Le réseau forestier est très discontinu, restreint aux abords des lacs et des rivières, ailleurs la toundra domine. Les espèces dominantes restent l'épinette grise (*picea glauca*) et le tamarac (*larix laricina*) près des côtes et l'épinette noire (*picea mariana*) dans l'intérieur. Le pin a disparu. Cet écotone est étroitement conditionné par le climat et les caractéristiques locales (exposition, permafrost).

(iii) Relief (figure 5)

Il y a trois grandes zones physiographiques étroitement liées à la géologie:

-Les Appalaches: chaîne de montagnes relativement récente. Le relief est vallonné, les altitudes atteignent 4100' en Gaspésie.

-Basses Terres du St Laurent: séparées des précédentes par l'accident de Logan. Relief très plat avec seulement les pointements des intrusions montégériennes plus dures (Mont Ste Hyacinthe). Les altitudes sont inférieures à 500'.

-Bouclier Canadien: (provinces Laurentienne et de James) il s'agit là de terrains très anciens (plusieurs milliards d'années) très

érodés. Le relief général est peu accentué sauf dans le cas de vallées glaciaires en "U", les altitudes sont également très faibles (1000' à 2000').

b) Les facteurs géologiques de l'érosion (figure 5)

(i) Lithologie

On divise généralement le Québec en trois régions:

- Le Bouclier Canadien: essentiellement cristallin.
- Les Appalaches: mélange de roches cristallines et sédimentaires plissées (calcaires, schistes, grès).
- Les Basses Terres: roches sédimentaires peu plissées (calcaires, schistes, grès).

Ces formations sont plus ou moins recouvertes de dépôts quaternaires. Les glaciations successives et surtout celle du Wisconsin, dont le retrait amorcé vers -12 000 ans s'est achevé vers -5000 ans, ont laissé des dépôts fluvio-glaciaires et glaciaires (moraines, kames, eskers). Après le retrait il y a des dépôts locaux d'argiles lacustres (Abitibi) ou marines (Basses Terres et Lac St Jean). Les Appalaches ont une faible couverture quaternaire, dans le Bouclier ces dépôts existent irrégulièrement tandis que les Basses Terres sont presque entièrement recouvertes de quaternaire.

Les argiles marines de la mer Champlain atteignent quelquefois 150' d'épaisseur dans les Basses Terres (J. M. PREVOST 1972). Ces dépôts argileux sont également importants dans la région du Lac St Jean où ils occasionnent de nombreux glissements.

A part quelques exceptions locales la lithologie du Québec (roches dures et peu solubles) ne prédispose donc pas à une érosion importante.

(ii) Hydrogéologie

Il est difficile d'aborder ce problème peu étudié jusqu'ici au Québec. Distinguons entre les aquifères superficiels liés au Quaternaire et les aquifères généralement plus profonds liés aux terrains primaires, secondaires et tertiaires.

-Dans les Appalaches calcaires et grès (Gaspé) peuvent être des formations aquifères. Pour le quaternaire les meilleurs aquifères sont les terrasses marines s'élevant de 200' à 300' au dessus du niveau marin actuel. En Beauce les eaux souterraines se rencontrent dans les anciens chenaux remplis de sables et graviers.

-L'hydrogéologie des Basses Terres a fait l'objet d'une étude récente (J. M. PREVOST 1972). Les formations aquifères sont essentiellement quaternaires et peuvent être divisées en 2 groupes séparés par des argiles imperméables:

- sables (basses terrasses, hautes terrasses, sables de dunes, sables marins).
- argile marine (mer de Champlain).
- dépôts glaciaires.

En raison de la forte salinité des argiles marines les eaux traversant cette formation seront beaucoup minéralisées, c'est souvent le cas des eaux des dépôts glaciaires. Nous donnons à titre d'exemple trois analyses d'eaux des dépôts glaciaires (J. M. PREVOST, Communication personnelle) Concentrations en mg/l.

	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	HCO ₃	NO ₃
1	43.7	5.9	trace	trace	10.5	25.1	61.6	1.0
2	750	102	1424	38	226	731	169	-
3	51.9	9.9	traces	traces	14.0	48.5	55.8	0.75

1 alluvions fluvio-glaciaires

2 alluvions fluvio-glaciaires à recouvrement d'argiles marines près de la zone d'alimentation

3 alluvions fluvio-glaciaires.

Dans le Bouclier Canadien les études ont été rares mais on peut prévoir que les eaux souterraines seront très localisées dans les zones fracturées.

Dans l'ensemble donc les eaux souterraines auront une influence mineure sur la qualité de l'eau. Cela se traduit, comme nous le verrons, par une faible variation de la minéralisation en fonction du débit.

c) L'érosion globale au Québec (turbidité et salinité)

D'après la discussion sur les facteurs de l'érosion il ressort que l'érosion au Québec sera très faible pour les raisons suivantes:

-climat peu agressif: températures basses, pluviométrie moyenne ou faible.

-couverture végétale omniprésente, sols gelés.

- relief très peu accusé.
- roches très résistantes, peu fracturées ou fissurées, très peu solubles.

Cependant dans certaines régions les conditions locales peuvent augmenter l'érosion: celle-ci est effectivement plus forte dans les Appalaches, particulièrement en Gaspésie à cause du relief et les argiles marines de la mer Champlain sont sans doute responsables de la minéralisation plus élevée des rivières des Basses Terres.

Nous donnons comme exemple les valeurs suivantes pour l'érosion mesurée par les transports dissous et solides (Analyses M.R.N.):

rivière	érosion chimique t/km ² /an	érosion détritique t/km ² /an	C _s	S
York	95	-	-	151
Chaudière	37	59	83	66
Harricana	24	13	27	49

Ces valeurs ne portent que sur un an (1969) mais sont d'une bonne représentativité car dans ces régions l'érosion est relativement régulière. Les rapports des modules annuels des débits sur la moyenne interannuelle étaient de 1.04 pour la York et de 1.27 pour la Harricana.

On voit que les salinités et les turbidités rentrent dans les catégories "peu turbides" et "peu minéralisées", il en va de même des érosions qui sont faibles et caractéristiques des rivières de plaines à climat tempéré et subarctique.

Remarquons que pour la Chaudière l'érosion chimique est du même ordre que l'érosion détritique et pour l'Harricana la dissolution l'emporte même dans le bilan. Ce phénomène est assez rare et est caractéristique des cours d'eau de plaine. De plus on voit bien que ce sont les facteurs externes de l'érosion qui l'emportent, puisque malgré la présence d'argiles lacustres sur le bassin de l'Harricana la turbidité reste très faible.

D'après les premières données de l'Annuaire Hydrographique, section Qualité des Eaux, les rivières Québécoises sont "peu turbides", c'est-à-dire que la turbidité moyenne est inférieure à 100 mg/l. Il est important de signaler qu'en plus des facteurs de l'érosion que nous avons vus, l'effet des retenues, réservoirs et lacs est primordial car dès qu'un cours d'eau entre dans un lac, la vitesse décroît rapidement, donc la capacité de transport, entraînant une sédimentation presque totale. Certaines rivières comme l'Harricana ou la St Maurice ont jusqu'à 9% de leur bassin occupé par des lacs, on voit donc l'importance que peut avoir ce phénomène.

Les transports solides et dissous suivent un cycle annuel. Comme nous le verrons, les concentrations dissoutes varient peu avec le débit ($|b| < 1/3$) et les apports dissous suivront étroitement les débits. Ainsi les principaux transports auront lieu lors des hauts débits c'est-à-dire essentiellement à la fonte des neiges. En 1969 par exemple un tiers des apports dissous de la Chaudière est passé en Avril. Pour les apports solides nous savons que la turbidité est exacerbée par le débit. Ce sont donc les crues de fonte de neige et aussi les crues d'orage, courtes mais érosives, qui correspondront aux apports majeurs. Pour la Chaudière en 1969, près de 65% des apports dissous sont passés en Avril et 9% pour la seule crue du 6 et 7 Novembre. On observe souvent ce deuxième pic de turbidité d'automne dû aux orages à cette époque: en 1969 l'Harricana a transporté autant de matériaux en suspension en

Novembre qu'en Mai.

d) Les éléments dissous majeurs. Provinces géochimiques

(i) Qualité des précipitations

Pour une région comme le Québec où la minéralisation des eaux est très faible, la part des éléments amenés directement par les précipitations peut être importante. A notre connaissance, aucune étude systématique n'a été réalisée au Québec aussi sommes-nous amenés à considérer les états voisins du Vermont et du New-Hampshire.

HENSON et VIBER (1969), en effectuant le bilan hydrochimique du lac Champlain, ont mesuré la concentration des précipitations à Burlington et Colchester (Vermont). PEARSON et FISHER (1971) ont étudié la qualité des précipitations dans le Nord Est des Etats-Unis notamment à Pittsburg (New-Hampshire) proche du Québec; les résultats sont les suivants (concentrations en mg/l, taux de retombées globales en $t/km^2/an$):

		Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	NO ₃	HCO ₃
Burlington et Colchester	mg/l	1.60	0.28	0.68	0.11	1.77	2.42		
	$t/km^2/an$	1.16	0.21	0.47	0.077	1.47	2.22		
Pittsburg	$t/km^2/an$	0.56	0.087	0.49	0.140	0.48	3.76	0.45	0.53

soit un total de $6.5 t/km^2/an$ à Pittsburg N. H. Il y a bien sûr des différences entre les deux localisations, elles sont surtout dues

aux modes de prélèvements et à la fréquence de l'échantillonnage et révèlent la difficulté de telles mesures.

L'origine de ces éléments est diverse: le chlorure et le sodium proviennent des aérosols marines sous forme de retombées sèches, le magnésium et le potassium ainsi que le calcium proviennent surtout des poussières atmosphériques; les sulfates ont une origine multiple à la fois naturelle (feu de forêts, volcanisme) et artificielle (combustion du charbon et du pétrole) leur concentration augmente particulièrement près des grandes villes (PEARSON et FISHER).

Ainsi dans une région peu habitée et située à plus de 100 milles des grandes zones urbaines, les retombées par les précipitations sont de l'ordre de $6 \text{ t/km}^2/\text{an}$. Or au Québec les chiffres obtenus pour les transports dissous atteignent des valeurs de $13 \text{ t/km}^2/\text{an}$ (Chamouchouane, Saguenay, St Maurice). On peut donc s'attendre à ce qu'une part importante des ions dissous transportés provienne déjà des précipitations et non pas de l'érosion. Pour les sulfates, les chlorures et les nitrates c'est peut-être la majeure partie des éléments transportés qui proviendrait des précipitations. C'est d'ailleurs ce qu'ont observé PEARSON et FISHER pour des rivières du Maine et du Nord de l'Etat de New-York. BARICA et ARMSTRONG arrivent à des conclusions analogues pour les éléments nutritifs dans des lacs du Bouclier Canadien en Ontario. On voit donc toute l'importance d'une étude approfondie de la qualité des précipitations.

Ce phénomène a été observée depuis longtemps en Finlande où les conditions climatiques, physiographiques et géologiques sont très semblables à celles du Québec. VIRO (1955) présente les données suivantes:

	Solides dissous transportés par les rivières (kg/km ² /an)	Solides dissous apportés par précipitation (kg/km ² /an)	Perte d'éléments nutritifs (kg/km ² /an)
Organiques	7,720	2,740	5,000
Inorganiques.....	8,430	3,170	5,300
SiO ₂	2,640	291	2,300
R ₂ O ₃	571	131	440
Ca	1,200	199	1,000
Mg	435	131	300
K	457	245	210
Na	560	183	360
P	26	8.6	17
SO ₄	1,420	416	1,000
Cl	561	576	+ 15
N	187	587	+ 400

Tableau VII Transports dissous en Finlande (in Viro)

(ii) Provinces géochimiques

Les seules analyses continues sont effectuées par le Ministère des Richesses Naturelles. Nous disposons actuellement de 19 stations permanentes toutes situées au Sud du 50° N et principalement le long de la vallée et de l'estuaire du St Laurent (tableau I). Nous n'avons donc qu'une idée très partielle de la qualité des eaux de la Province. En nous basant sur les valeurs moyennes annuelles, nous pouvons faire une première distinction d'au moins 4 types d'eaux (tableau II):

-Appalaches (Matapédia, York, Ste Anne, Eaton)

Eaux "moyennement minéralisées" (95 à 150 mg/l de concentration globale*), essentiellement bicarbonatées calciques (80% et plus des sels dissous).

-Beauce et Bas du Fleuve (Rimouski, Du Loup, Chaudière, St François)

Eaux "peu minéralisées" (60 à 115 mg/l), toujours bicarbonatées calciques avec une teneur en sulfates plus élevée que dans les Appalaches (9 à 13 mg/l). La Yamaska serait à rapprocher de ces eaux mais elle a en plus des teneurs élevées en Na et Cl qui ne sont pas expliquées actuellement.

-Basses Terres (Chateauguay)

La Chateauguay est la seule rivière étudiée drainant essentiellement les terrains sédimentaires des Basses Terres. Sa minéralisation est "moyenne" (185 mg/l), les eaux sont bicarbonatées calciques avec une proportion importante de sulfates (15%).

* concentration globale = somme des ions majeurs en mg/l

-Bouclier Canadien (St Maurice, Ste Anne de la Pêrade, Chamouchouane,
Saguenay, Harricana)

Toutes ces rivières appartiennent à la catégorie des eaux "peu minéralisées" (20 à 50 mg/l). Les bicarbonates et le calcium sont les ions majeurs mais les sulfates constituent de 10 à 30% des sels dissous. Pour la Saint Charles et la Des Outaouais l'influence anthropique est certaine, elle se traduit par une augmentation du sodium et des chlorures pour la première et par une minéralisation légèrement plus forte (65 mg/l) pour la deuxième.

Malgré les données encore fragmentaires, on peut avancer qu'au Nord du 50° N les eaux sont encore moins chargées et peuvent sans doute être classées dans la catégorie "très peu minéralisées". Nous donnons à titre d'exemple des analyses des rivières Arnaud et George se jettant dans la Baie d'Ungava et de la Grande Rivière de la Baleine se jettant dans la Baie d'Hudson (Annuaire Qualité des Eaux 1969).

	pH	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	HCO ₃	Conductivité
Arnaud 23-2-1969	6.8	1.2	0.9	0.5	0.1	1.0	0.0	6	14
George 19-4-1969	6.8	2.4	0.7	0.4	0.2	0.0	2	10	21
Grande Rivière 14-8-1969	6.0	1.2	0.4	0.9	0.3	0.5	2.0	5	15
Vuoksi		3.8	1.2	-	1.7	1.5			

Nous avons joint à ce tableau les concentrations moyennes annuelles de la rivière Vuoksi en Finlande (61 000 km²) d'après

VIRO (1955), dont les caractéristiques physiographiques, géologiques et climatiques sont très proches de celles du Nord du Québec. On voit tout de suite l'analogie des valeurs. Comme nous l'avons écrit plus haut, pour de telles rivières l'apport atmosphérique peut être déterminant dans la minéralisation de l'eau.

(iii) Relations conductivité - concentrations

La conductivité X est un paramètre aisément mesurable en continu. Il est donc intéressant de voir sa relation avec la salinité globale S et avec les concentrations élémentaires. Au Québec comme ailleurs (HEM 1970) la salinité S est proportionnelle à la conductivité X :

$$S = k X + \alpha \quad (\text{forme 1})$$

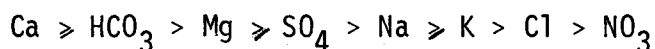
$$S = k' X + \alpha' X^2 \quad (\text{forme 2})$$

Pour les 6 rivières étudiées (tableau V) la corrélation entre S et X est excellente que ce soit sous la forme 1 ou 2. Si on considère les concentrations élémentaires du calcium et des carbonates, la corrélation est bonne quand ils sont abondants (York, Eaton) mais elle est médiocre pour les rivières à faible minéralisation (Ste Anne de la Pérade). Pour tous les autres éléments (Na , K , Cl , SO_4 , NO_3) la corrélation est médiocre (< 0.5), voir nulle pour les nitrates.

(iii) Variations des concentrations élémentaires

Les concentrations des différents ions varient au cours de l'année, une bonne estimation de cette variabilité est donnée par le rapport écart-type/concentration moyenne donné par l'Annuaire Hydrologique (tableau II). Quel que soit le type d'eau étudié

les éléments les plus constants sont dans l'ordre:



peu variable

très variable

Généralement la cause la plus courante est le débit. Cette variation est difficile à étudier au Québec car nous ne disposons généralement pas de débits instantanés et d'analyses ponctuelles (la plupart sont des composites), de plus les débits sont bien souvent influencés à l'échelle de la journée. Nous savons que la variation avec le débit est due à la présence d'eaux souterraines plus chargées que les eaux de surface. Or nous avons vu qu'au Québec les eaux souterraines sont peu importantes et généralement localisées, cet effet sera donc restreint.

En fait la variation avec le débit si elle existe, reste faible et le coefficient $|b'|$ de la relation $S = a' Q_x^{b'}$, est toujours inférieur à 1/3 même pour les rivières Gaspésiennes (0.11 pour la York et 0.20 pour la Eaton, voir figure 6). Pour les concentrations élémentaires il en est de même: le calcium, les bicarbonates et le magnésium diminuent généralement avec le débit mais la dispersion est importante (figure 7).

-La relation concentration - débit varie d'une rivière à l'autre (dans l'espace) et même d'une saison à l'autre (dans le temps). En raison du problème des composites nous ne pouvons pas examiner les concentrations élémentaires mais on peut étudier la conductivité, qui est mesurée tous les jours, en la rapportant au débit correspondant. On peut ainsi mettre en évidence des cycles de crues.

La crue de printemps est toujours dans le sens horaire que ce soit

pour la Eaton, York, Chateauguay, Ste Anne de la Pêrade, Chamouchouane ou Harricana: à débit égal les eaux de début de crue sont plus chargées que les eaux de décrues. Tout se passe comme s'il y avait lessivage de sels dissous au début de la fonte.

En été et en automne, les crues observées sont tantôt dans un sens tantôt dans l'autre (figure 8). L'interprétation de ce phénomène n'est pas satisfaisante actuellement.

Enfin le comportement des éléments très variables (NO_3 , Cl, K, Na) est difficile à comprendre: ces variations ne dépendent pas du tout du débit, car ces ions se trouvent généralement en faibles quantités dans les eaux souterraines. La variation des nitrates pourrait sans doute être liée à l'activité biologique comme l'ont remarqué JOHNSON et al (1969) dans le New-Hampshire. D'autres causes peuvent augmenter la variabilité des éléments précités: l'erreur d'analyse qui peut être importante en raison des faibles concentrations, et la pollution par les activités humaines.

En conclusion, cette étude préliminaire montre que les éléments les plus abondants, bicarbonates, calcium, sulfates et magnésium sont ceux dont les variations sont les plus faibles. Ces variations peuvent s'expliquer aisément par dilution des eaux souterraines légèrement plus chargées que les eaux de surfaces. Par contre les éléments secondaires (NO_3 , Cl, K, Na) ont des variations fortes qui sont encore mal comprises.

3. ECHANTILLONNAGE ET MESURE DES PARAMETRES

a) Choix des paramètres

-La turbidité est un paramètre important de la qualité de l'eau.

En empêchant la pénétration de la lumière, les matières en suspensions réduisent l'activité photosynthétique ce qui peut avoir un effet sur la teneur en oxygène; elles peuvent également être le support de bactéries; les suspensions argileuses ont aussi un effet sur la qualité de l'eau par des échanges de base (KENNEDY 1964). Parallèlement à la mesure des teneurs en suspensions, il est important de connaître la granulométrie et la composition (minéralogie, fraction organique) de celles-ci particulièrement dans les rivières sujettes à la pollution par les usines de Pâtes et Papiers.

-La conductivité reflète fidèlement la minéralisation globale de l'eau. Elle permet généralement d'avoir une bonne estimation du Ca et HCO_3 sur lesquels on peut baser une classification générale des eaux au Québec et une estimation médiocre d'autres ions, pour autant que des études préliminaires soient effectuées. De plus la minéralisation globale est un des facteurs les mieux relié à la productivité des eaux au Canada (NORTHCOTE et LARKIN 1956).

-silice: c'est un élément nutritif important pour certains groupes (diatomées), de plus pour les eaux très peu minéralisées, elle peut être un constituant majeur des sels dissous. Actuellement nous n'avons presque pas d'information sur la silice dans les eaux québécoises.

-sodium et chlorures: Ces éléments ne peuvent généralement pas être estimés par la conductivité. Ils sont souvent caractéristiques des apports anthropiques (teneurs élevées du St Laurent, de la St Charles) et par comparaison avec les teneurs naturelles, ils peuvent donner une bonne idée de la pollution générale.

-précipitations: l'apport des précipitations en sels minéraux est

important pour la plupart des ions. Dans le Nouveau Québec, il est probable que les précipitations apportent une grande part des ions dissous transportés. Le changement de qualité des eaux aux abords des grandes cités vis-à-vis des chlorures ou des sulfates peut être dû en partie à la pollution atmosphérique. L'étude des précipitations nous semble essentielle pour comprendre le chimisme des eaux québécoises.

Enfin, outre l'effet sur les organismes aquatiques, les sels minéraux majeurs ont une importance pour les différents utilisateurs. Mais il faut remarquer qu'en raison de la très faible minéralisation des eaux, aucune norme concernant la potabilité, baignade ou l'irrigation n'est dépassée au Québec pour ces ions. Pour l'usage industriel, les eaux sont généralement excellentes, néanmoins pour l'industrie textile, les eaux des Appalaches sont un peu trop minéralisées ($S > 100 \text{ mg/l}$).

b) Echantillonnage

-Rivières

Pour connaître réellement le chimisme des eaux naturelles du Québec, il faudrait des stations permanentes en plus grand nombre, au moins 5 par provinces géochimiques: Appalaches, Beauce et Bas du Fleuve, Terres Basses, Bouclier Canadien au Sud du 50° N , Bouclier Canadien au Nord du 50° N . Pour le Bouclier au Sud du 50° N , il faudrait en fait une dizaine de stations. Ce réseau de base d'une trentaine de stations permettrait d'amorcer une régionalisation de la qualité naturelle de l'eau mais serait insuffisant pour des études poussées. (En Finlande il y a un réseau de 160 stations pour $110\,000 \text{ mi}^2$, cf. LAAKSONEN, 1971).

Les stations serviraient de référence pour juger de l'évolution générale de la qualité, à cette fin il faudrait qu'elles soient loin de sources de pollution ponctuelles ou dans des bassins à trop forte densité de population.

-Pour chaque rivière on devra disposer des débits journaliers, et des débits instantanés au moment du prélèvement.

-La turbidité et la conductivité seront mesurées en continu par des appareils ad hoc, ces deux paramètres seront calibrés par des prélèvements ponctuels (composites à proscrire) d'une fréquence au moins hebdomadaire.

-Sur chaque prélèvement seront déterminés les éléments majeurs (Ca, Mg, Na, K, Cl, SO_4 , HCO_3 , NO_3) ainsi que la silice.

La fréquence de prélèvement hebdomadaire permettra d'étudier pour chaque ion les variations saisonnières, la crue de printemps mais pas les variations à l'échelle de la journée (crues d'été). Celles-ci pourront être étudiées globalement par l'enregistrement de la conductivité.

-précipitations: la récolte des précipitations pourrait se faire aux stations météorologiques déjà existantes. Au Nord du 50^0 N cette étude pourrait être menée sur les 6 stations continentales et sur quelques stations côtières. Au Sud du 50^0 N une dizaine de stations devrait suffire, avec une densité accrue dans la région de Montréal. PEARSON et FISHER avaient un réseau de 18 stations pour les états du N. E. des U.S.A., de New-York au Maine. Des récoltes mensuelles seraient suffisantes.

c) Mesure

La turbidité pourrait être mesurée en continu par un turbidimètre

optique tel que celui du BRITISH TRANSPORT DOCK BOARD particulièrement sensible aux faibles turbidités ($< 1000 \text{ mg/l}$).

conductivité: cf. conductivimètres actuellement utilisés.

éléments majeurs idem: Le problème le plus important est la conservation de l'échantillon prélevé. Ce problème est particulièrement aigu pour les rivières très éloignées (Nouveau Québec). Enfin les méthodes d'analyses employées pour les eaux de la catégorie "très peu minéralisée" ($S < 10 \text{ mg/l}$) devraient être aussi précises que celles employées pour les rivières plus minéralisées ($S = 100 \text{ mg/l}$).

précipitations: les instruments collecteurs ont été décrits par PEARSON et FISHER (1971).

4. TRAITEMENT DES DONNEES

Deux types principaux de données vont être obtenues: les informations sur les concentrations seront utiles pour les utilisateurs multiples de la rivière, notamment pour les normes, les études de toxicité etc..., il s'agit essentiellement d'un traitement statistique. D'autre part, la combinaison des concentrations et des débits permettra le calcul de bilans également très utilisés pour les études de pollution, les études d'érosion etc...

a) Analyse statistique des concentrations

-Très peu d'auteurs ont abordé cette étude, citons LEDBETTER et GLOYNA (1964) et l'équipe du WATER RESEARCH LABORATORY. A une station donnée les concentrations varient dans le temps, cette variation est le mieux étudiée par un appareil de mesure en continu, mais là encore le temps de réponse de l'appareil déterminera le niveau de microfluctuation mesurable (une seconde, une minute etc...)

En général on dispose de mesures sur des échantillons ponctuels pris régulièrement. En classant les valeurs suivant leur fréquence, on peut définir les paramètres statistiques classiques: moyenne arithmétique, mode, médiane (percentile à 50%), et percentiles. Chacun de ces paramètres peut avoir une signification pour les études de qualité.

-la moyenne arithmétique est la valeur moyenne de la concentration en fonction du temps, pendant la période de mesure.

-le mode est la concentration qui a existé le plus souvent dans la rivière pendant la période de mesure.

-la médiane est la limite de concentration qui a existé 50% du temps pendant la période de mesure.

-les percentiles à 5% et 95% sont les concentrations minimales et maximales dépassées pendant 95% du temps de mesure.

-Ces valeurs des paramètres ne sont que des estimations des valeurs réelles, (telles qu'on aurait pu les déterminer par une surveillance continue) elles sont fonction de la fréquence du prélèvement vis-à-vis du phénomène cyclique à étudier.

-Le nombre d'échantillon requis est fonction de la répartition statistique des concentrations (définie par l'écart-type σ généralement), de la précision p recherchée, et du niveau de confiance C auquel on se place. Par exemple pour déterminer une médiane μ avec une précision p le nombre d'échantillon sera de $(k \sigma/p)^2$, k étant un coefficient fonction du niveau de confiance (à un niveau de 95%, $k = 1.96$). Pour déterminer un percentile 5%-95%, le nombre d'échantillon augmente considérablement, il vaut alors $(f k \sigma/p)^2$ où f est un coefficient fonction du percentile

($f = 2.09$ pour le percentile 5%-95%). Le Department of Environment de Grande Bretagne a ainsi montré que pour déterminer la moyenne géométrique de l'ammoniaque dans la Trent, à $C = 95\%$ et $p = 0.2$ mg/l, il fallait 180 échantillons, et pour le percentile 95, avec $C = 95\%$ et une précision de seulement 0.4 mg/l il fallait 1350 échantillons! On voit la difficulté d'obtenir des informations statistiquement valables.

-Or les valeurs des percentiles sont particulièrement importantes pour déterminer les concentrations maximales qui seront peut-être néfastes à la faune et la flore, ou qui nécessiteront des traitements spéciaux de la part des utilisateurs (adoucissement), ou inversement les concentrations minimales, qui pourraient être des facteurs limitant (par exemple dans le Nouveau Québec), ou qui pourraient avoir des effets catastrophiques (oxygène).

-De plus les valeurs des percentiles ne sont même pas suffisantes en effet si pendant 5% de l'année la concentration en O_2 est inférieure à 3 mg/l soit 18 jours, l'effet sera très différent si ces journées sont consécutives ou réparties pendant toute l'année. Il faut donc s'intéresser aux concentrations extrêmes existant pendant des longues périodes consécutives.

D'autres études statistiques spécifiques devraient également être menées en fonction des différentes utilisations envisagées par exemple: qualité de l'eau en été au moment où la consommation domestique et l'usage récréationnel augmentent; qualité à certaines "périodes biologiques" (éclosion des oeufs de poisson, développement du plancton); qualité sous couvert de glace etc...

D'une façon très générale, il faudrait déterminer la moyenne arithmétique, l'écart-type et le percentile 5-95 encore faut-il déterminer clairement au préalable la question à laquelle l'information de qualité doit répondre, son degré de précision, et à quel

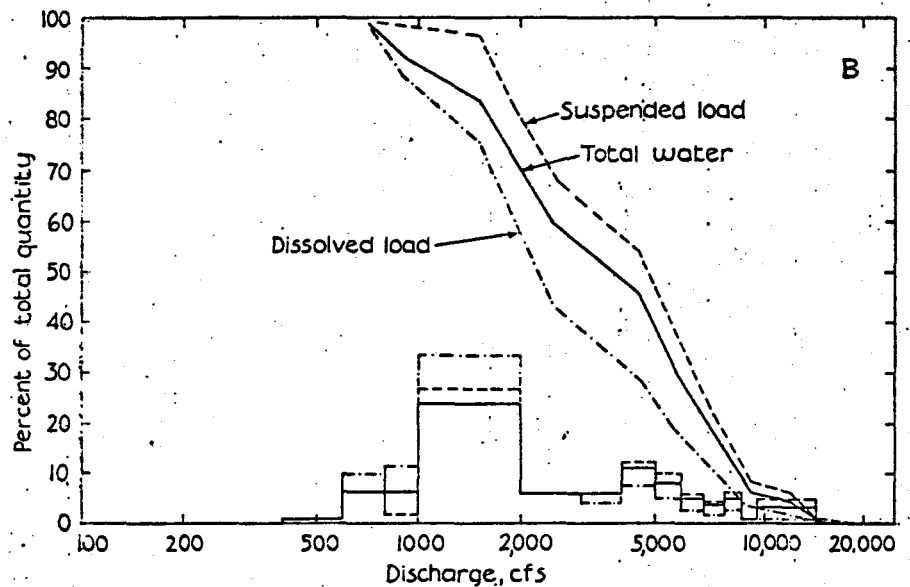
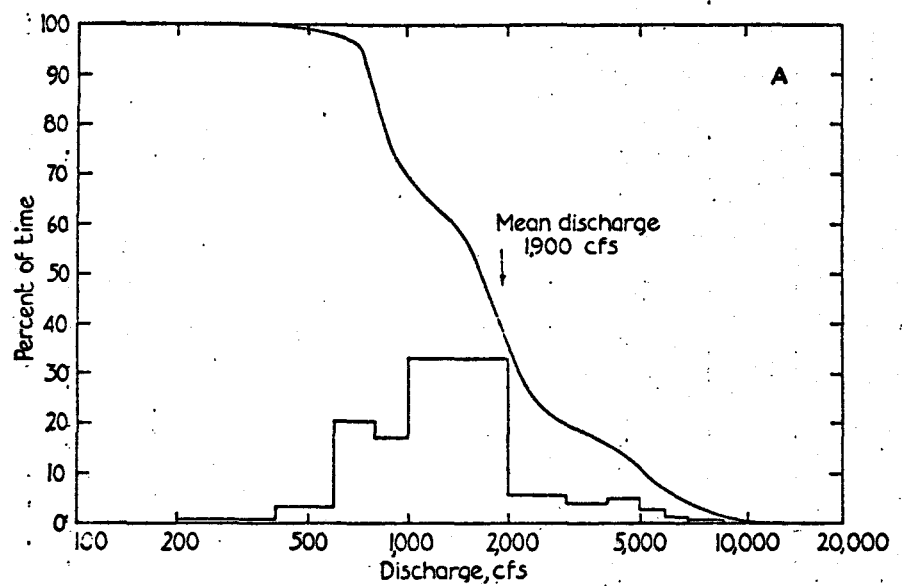


Figure 29. Histograms and cumulative graphs of water and load, Big-horn River at Thermopolis, Wyoming. A. Duration curve of water, showing percentage of time various discharge rates are equaled or exceeded. B. Cumulative graphs and histograms showing relative contribution of various discharge rates to total flow of water, suspended load, and dissolved load.

niveau de confiance on se place (Pour les études d'éléments toxiques, il sera peut-être nécessaire d'augmenter le niveau de confiance à 99%). Une étude préliminaire, ou l'utilisation des données déjà existantes, permettra d'estimer statistiquement la fréquence de l'échantillonnage requise pour établir la caractéristique de qualité voulue avec une certaine précision à un niveau de confiance donné. Par exemple cette étude préliminaire devrait mettre en évidence les variations cycliques de concentration de façon à déterminer une fréquence d'échantillonnage légèrement supérieure à la fréquence des variations non cycliques (le cas des variations diurnes devrait être particulièrement examiné).

b) Bilans

-Fréquence des apports

Dans un bilan, il intervient à la fois la répartition des débits et celle des concentrations. Quand il existe une bonne relation entre les débits et les concentrations, l'étude des apports peut être plus simple. Un excellent exemple est fourni par LEOPOLD, WOLMAN et MILLER (1964) pour la rivière Bighorn, Wyoming. La figure 8 représente les histogrammes de fréquence des débits, des quantités d'eau écoulées, des charges en suspension et des charges en solution. Ainsi le débit moyen interannuel est de $1900 \text{ pi}^3/\text{s}$, cette valeur est dépassée seulement 40% du temps.

La fréquence des quantités d'eau écoulées pour chaque débit est portée sur la figure 8-B: par exemple les débits entre 400 et $600 \text{ pi}^3/\text{s}$ ont été observés 3.6% du temps (5.5 années d'étude) mais ils ne correspondent qu'à 0.9% du volume d'eau écoulé. Pour les forts débits, les crues de plus de $10\,000 \text{ pi}^3/\text{s}$ ont lieu pendant moins d'1% du temps et correspondent à 6% de l'écoulement.

En classant les charges journalières en solution ou en suspension, on peut également tracer les mêmes courbes cumulées de fréquence: celle des charges en solution est toujours en-dessous de celle des apports liquides en raison de la diminution des concentrations avec le débit, au contraire la courbe des charges en suspension est toujours au-dessus pour la raison inverse. Ainsi on peut chiffrer les apports dus à des événements rares: par exemple les crues de plus de $10\,000 \text{ pi}^3/\text{s}$ apportent 9% des apports totaux. Aux débits de moins de $5500 \text{ pi}^3/\text{s}$ correspondent 57% de la charge en suspension. Donc ce sont les débits moyens qui transportent la majeure partie des éléments dégagés par l'érosion. En effet si les crues catastrophiques ont des capacités de transport énormes, leur fréquence est très faible et leur influence sur les bilans le sera aussi. Plus le régime d'une rivière est régulier (cas du Québec) plus le transport sera effectué par les débits moyens.

-Mode de calcul des bilans

Méthode des classes de débits: On établit d'abord la relation concentration - débit, puis on divise la gamme de débit de l'épisode considéré en N intervalles égaux suivant une progression géométrique, à chaque classe j définie par un débit moyen $Q_{\ell j}$ correspond une concentration moyenne C_j . D'après les courbes de fréquence des débits, on peut déterminer le temps T_j pendant lequel il a eu un débit compris dans la classe $Q_{\ell j}$. Les apports M_j de cette classe sont donc

$$M_j = \overline{Q}_{\ell j} T_j C_j \quad \text{et le bilan annuel } M = \sum_{j=1}^N M_j$$

Cette méthode est particulièrement adaptée pour les bilans

d'apports dissous quand la relation $C = f(Q_\ell)$ est bien déterminée et lorsque l'échantillonnage n'est pas fréquent (HEMBREE et RAINWATER 1961). Mais elle a aussi été appliquée pour les apports solides (HALL 1967).

Méthode des classes de charges dissoutes ou solides: C'est une variante de la première: à chaque débit liquide Q_ℓ on mesure une concentration C , le produit des deux correspond à un débit solide Q_s ou dissous Q_d instantané. On trace le graphe Q_s ou $Q_d = f(Q_\ell)$, généralement la relation est bien définie, à chaque classe de débit liquide $\overline{Q_{\ell j}}$ correspond un débit solide ou dissous moyen $\overline{Q_{sj}}$ ou $\overline{Q_{dj}}$.

Le bilan s'écrit alors:

$$M = \sum_{j=1}^N \overline{Q_{sj}} T_j$$

Cette méthode a été appliquée par HENSON (1972).

Méthode simplifiée: La plupart du temps la relation $Q_d = f(Q_\ell)$ est linéaire. Pour les rivières dont les concentrations dissoutes varient très peu avec le débit ($|b'| < 0.1$), comme c'est généralement le cas au Québec, on peut avoir une bonne estimation de la charge dissoute annuelle en cherchant le débit dissous Q_d correspondant au débit moyen annuel Q_ℓ , le bilan annuel s'obtient alors directement.

Méthode des conductivités: Elle est basée sur les relations conductivité - concentration globale ou concentrations élémentaires. La conductivité peut être enregistrée en continu. La concentration moyenne journalière est généralement obtenue en prenant la conductivité moyenne journalière, en multipliant par le débit moyen jour-

nalier on obtient le débit dissous jour par jour.* Au Québec, cette méthode pourrait être appliquée pour faire le bilan des sels dissous totaux, et en général le bilan du calcium et des bicarbonates, ions majeurs bien reliés à la conductivité (LEDBETTER et GLOYNA, HENDRICKSON et KRIEGER etc...).

Méthode "classique": Pour les éléments qui ne varient pas avec le débit, ou qui ne sont pas reliés à la conductivité, il faut un échantillonnage beaucoup plus serré déterminé alors par une étude statistique. La plupart du temps la fréquence d'échantillonnage est journalière, c'est le cas notamment des mesures de turbidité. La turbidité mesurée une fois dans la journée est rapportée au débit moyen journalier pour calculer la charge journalière. Cette méthode est approchée dans le cas des petits bassins où le débit et les concentrations varient pendant une journée, on doit alors multiplier les prélèvements.

Problème des composites: Souvent on ne peut effectuer que des échantillons composites. Si on veut obtenir une concentration moyenne dans le temps, les concentrations seront pondérées suivant l'intervalle de temps des périodes qu'ils représentent. Mais si on veut obtenir des bilans d'apports, il importe alors de pondérer par les débits moyens correspondants. La différence entre les deux méthodes peut dépasser 20% pour les concentrations moyennes (HEM 1970, p. 243) l'une étant la moyenne statistique précédemment définie, l'autre la moyenne pondérée telle que $\bar{C} = \frac{M}{V}$

où M est la charge pendant la période considérée
 V est le volume " " " " .

* Nota: On choisit généralement un pas de temps d'un jour, il est évident que si les variations journalières sont importantes, le pas de temps devra être réduit.

Nom de la rivière	# de la station de débit	Bassin versant (mi ²)	ALTITUDE			POURCENTAGE				Débit spécifique pi ³ /s/mi ² (*)
			de la station (pi)	maximum du bassin (pi)	moyenne du bassin (pi)	de lac	de forêts	de marais	pente moy.	
Matapédia	011,507	1,070	150-200			3.0				1.50(1)
York	020,401	390	40	2,850	1,250	1.0	99.0	0.0	2.1	1.97(24)
Ste-Anne G.	021,405	304	50	2,600	1,870	1.0	99.0	0.0	4.9	2.84(2)
Matane	021,601	636	70-80	1,800	1,150	1.0	94.0	0.0	1.8	2.17(47)
Rimouski	022,003	612	50-100	1,850	950	3.0	92.0	0.0	1.2	1.85(46)
Du Lac	022,513	401	307	1,700	960	1.0	83.0	1.0	1.5	1.62(46)
Chaudière	023,402	2,250	467-480	3,880	1,290	1.0	69.0	1.0	1.3	1.75(48)
St-François	030,203	3,710			1,120	3.0	69.0	2.0	1.2	1.73(43)
Eaton	030,234	248	625	2,000	1,320	0.0	84.0	4.0	1.3	1.73(37)
Yamaska	030,302	491	200-225	2,700	630	1.0	42.0	0.0	1.1	1.43(30)
Chateauguay	030,901	951	75-100							1.18(48)
Des Outaouais	043,118	55,200								1.25(97)
St-Maurice	050,115	16,300		1,900	1,430	9.0	89.0	1.0	.8	1.55(59)
Ste-Anne P	050,408	599	425-430	2,600	1,660	3.0	95.0	0.0	1.9	2.79(4)
St-Charles	050,904	138	25-50	2,500	890	1.0	76.0	1.0	2.3	1.55(3)
R. des Eaux Volées	051,003	3.54	1,850-1,900	3,250		0.0				2.85(3)
Chamouchouane	061,901	5,920	400	1,800	1,400	5.0	92.0	3.0	.7	1.84(7)
Saguenay	062,901	28,200								1.84(57)
Magpie	073,502	2,930		2,000	1,920	9.0	89.0	1.0	1.6	2.23(8)
Harricana	080,101	1,420	960-970	964	1,070	9.0	72.0	14.0	.3	1.53(55)

TARLEAU I - CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES DES BASSINS

(*) : Années de mesures.

Nom de la rivière	# de la station de qualité	Bassin versant (mi ²)	Concentration moyenne pour 1969 (mg/l)								Concentration globale (mg/l)	Erosion ¹ globale (tonne métrique/an X mi ²)	Rapport écart-type / conc. moyenne (1969)							
			Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	SO ₄	Cl	NO ₃			Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	SO ₄	Cl	NO ₃
**Matapédia	01150 A	1,440	26.2	3.8	2.1	.4	94	5.5	1.1	.9	134.0	**179.5	.16	.13	.48	.25	.15	.29	1.0	6.3*
York	02040 A	390	29.0	3.8	3.6	.4	100	9.6	3.9	.7	151.1	265.8	.18	.20	.26	.37	.15	.28	.28	.71
Ste-Anne G.	02140 B	304	21.8	4.0	2.5	.4	81	6.1	2.7	.5	119.0	301.8	.27	.22	.44	.75	.25	.43	.56	.80
Matane	02160 A	636	27.5	3.4	3.1	.4	94	7.8	2.9	1.0	140.2	271.7	.22	.21	.29	.24	.20	.35	.41	.70
Rimouski	02200 A	612	20.2	3.4	4.1	.6	69	12.4	3.3	.8	113.8	188.0	.14	.21	.39	.28	.13	.48	.55	.62
**Du Loup	02250 A	490	10.5	1.3	3.7	.6	30	9.1	3.0	1.0	59.2	** 85.6	.23	.31	.27	.67	.30	.34	.47	.50
Chaudière	02340 A	2,250	10.5	2.3	3.5	.9	33	9.7	3.6	2.2	65.7	102.7	.29	.26	.57	.44	.27	.19	.94	.77
St-François	03020 A	3,710	19.1	3.2	6.1	.9	63	13.2	6.2	1.5	113.2	174.9	.14	.16	.44	.33	.17	.18	.40	.93
**Eaton	03020 X	225	17.7	2.9	2.5	.6	59	7.6	3.0	1.4	94.7	**146.3	.27	.28	.56	.50	.29	.30	.77	.79
Yamaska	03030 B	491	17.5	2.7	12.2	1.5	45	16.5	15.8	3.2	114.4	146.1	.24	.30	.60	.33	.32	.27	.59	.75
Chateauguay	03090 A	951	29.9	8.8	6.9	1.7	100	27.4	8.1	1.6	184.4	194.3	.15	.30	.39	.24	.17	.19	.27	.56
Des Outaouais	04310 A	55,200	10.5	2.4	3.1	.9	31	13.1	2.6	1.6	65.2	72.8	.25	.21	.29	.22	.25	.16	.46	.62
**St-Maurice	05010 A	16,600	4.2	.7	2.1	.5	11	7.3	1.1	.7	27.6	** 38.2	.24	.57	.29	.40	.25	.18	.91	.71
Ste-Anne P.	05040 A	599	2.4	.5	1.7	.3	6	5.0	1.3	.8	18.0	44.8	.25	.40	.47	4.67*	.28	.26	.35	.75
**St-Charles	05090 A	130	5.4	1.2	4.1	.7	16	6.4	4.4	1.4	39.6	** 54.8	.19	.25	.34	.29	.26	.52	.48	.79
R. des Eaux-Verdes	05100 B	3.54	2.2	.4	1.0	.3	8	3.1	.3	.1	15.4	39.2	.27	.50	.20	.67	.31	.45	1.0	2.0
Chamouchouane	06190 A	5,920	3.6	1.1	.9	.4	14	2.4	.3	1.1	23.8	39.1	.36	.27	.22	.50	.29	.50	2.0	.55
**Seguénay	06290 B		3.4	.8	1.1	.4	11	3.8	1.1	.9	22.5	** 37.0	.15	.25	.91	.25	.18	.34	.73	.67
(NR) Magpie	07350 A	2,930																		
Harricana	08010 A	1,420	8.5	2.0	2.0	.9	19	13.9	1.8	.9	49.0	66.9	.20	.15	.20	.33	.16	.13	.56	.78

	EROSION SPECIFIQUE (tonne métrique / an X mi ²)							
Rivière	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	SO ₄	Cl	NO ₃
Matapédia	35.1	5.1	2.8	.5	125.9	7.4	1.5	1.2
York	51.0	6.8	6.4	.8	175.9	16.9	6.9	1.2
Ste-Anne G	55.3	10.1	6.3	1.0	205.4	15.5	6.8	1.3
Matane	53.3	6.6	6.0	.9	182.2	15.1	5.6	1.9
Rimouski	33.4	5.6	6.8	1.0	114.0	20.5	5.5	1.3
Du Loup	15.2	1.9	5.4	.9	43.4	13.2	4.3	1.4
Chaudière	16.4	3.6	5.5	1.4	51.6	15.2	5.6	3.4
St-François	29.5	4.9	9.4	1.4	97.3	20.4	9.6	2.3
Eaton	27.3	4.5	3.9	.9	91.1	11.7	4.6	2.2
Yamaska	22.3	3.4	15.6	1.9	57.5	21.1	20.2	4.1
Chateauguay	31.5	9.3	7.3	1.8	105.4	28.9	8.5	1.7
Des Outaouais	11.7	2.7	3.5	1.0	34.6	14.6	2.9	1.8
St-Maurice	5.8	1.0	2.9	.7	15.2	10.1	1.5	1.0
Ste-Anne P	6.0	1.2	4.2	.7	14.9	12.5	3.2	2.0
St-Charles	7.5	1.7	5.7	1.0	22.1	8.9	6.1	1.9
R. des Eaux-Volées	5.6	1.0	2.5	.8	20.4	7.9	.8	.3
Chamouchouane	5.9	1.8	1.5	.7	23.0	3.9	.5	1.8
Saguenay	5.6	1.3	1.8	.7	18.1	6.2	1.8	1.5
Harricana	11.6	2.7	2.7	1.2	26.0	19.0	2.5	1.2

TABLEAU III - EROSION SPECIFIQUE DE CHAQUE ELEMENT

	(100 X conc. moyenne / conc. globale moyenne)							
Rivière	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	SO ₄	Cl	NO ₃
	%	%	%	%	%	%	%	%
Matapédia	19.6	2.8	1.6	.3	70.1	4.1	.8	.7
York	19.2	2.5	2.4	.3	66.2	6.4	2.6	.5
Ste-Anne G	18.3	3.4	2.1	.3	68.1	5.1	2.3	.4
Matane	19.6	2.4	2.2	.3	67.0	5.6	2.1	.7
Rimouski	17.8	3.0	3.6	.5	60.6	10.9	2.9	.7
Du Loup	17.7	2.2	6.2	1.0	50.7	15.4	5.1	1.7
Chaudière	16.0	3.5	5.3	1.4	50.2	14.8	5.5	3.3
St-François	16.9	2.8	5.4	.8	55.7	11.7	5.5	1.3
Eaton	18.7	3.1	2.6	.6	62.3	8.0	3.2	1.5
Yamaska	15.3	2.4	10.7	1.3	39.3	14.4	13.8	2.8
Chateauguay	16.2	4.8	3.7	.9	54.2	14.9	4.4	.9
Des Outaouais	16.1	3.7	4.8	1.4	47.5	20.1	4.0	2.5
St-Maurice	15.2	2.5	7.6	1.8	39.9	26.4	4.0	2.5
Ste-Anne P	13.3	2.8	9.4	1.7	33.3	27.8	7.2	4.4
St-Charles	13.6	3.0	10.4	1.8	40.4	16.2	11.1	3.5
R. des Eaux-Volées	14.3	2.6	6.5	1.9	51.9	20.1	1.9	.6
Chamouchouane	15.1	4.6	3.8	1.7	58.8	10.1	1.3	4.6
Saguenay	15.1	3.6	4.9	1.8	48.9	16.9	4.9	4.0
Harricana	17.3	4.1	4.1	1.8	38.8	28.4	3.7	1.8

Rivière (station)	FORME 1 $Y = A X - B$	Coefficient de corrélation	FORME 3 $Y = A X - B X^2$	Coefficient de corrélation
York 02040 A 45 mesures	$S = .739 X + 8.149$ $Ca = .138 X + 3.969$ $Mg = .011 X + 1.053$ $Na = .024 X - 1.270$ $K = .003 X - .209$ $HCO_3 = .508 X + 2.759$ $SO_4 = .047 X - .789$ $Cl = .017 X + .405$ $NO_3 = -.009 X + 2.226$	.9875 .9363 .3632 .8147 .6836 .9739 .5345 .3800 .4713	$S = .836 X - 2.76 * 10^{-4} X^2$ $Ca = .187 X - 1.45 * 10^{-4} X^2$ $Mg = .0208 X - 2.05 * 10^{-5} X^2$ $Na = .00978 X + 3.75 * 10^{-5} X^2$ $K = .00104 X + .666 * 10^{-5} X^2$ $HCO_3 = .541 X - .948 * 10^{-4} X^2$ $SO_4 = .0403 X + 1.26 * 10^{-5} X^2$ $Cl = .0215 X - 1.11 * 10^{-5} X^2$ $NO_3 = .0151 X - .622 * 10^{-4} X^2$	.9879 .9409 .3401 .8140 .6878 .9740 .5331 .3796 .4209
Eaton 03020 X 71 mesures	$S = .761 X + .842$ $Ca = .139 X + .967$ $Mg = .021 X + .077$ $Na = .025 X - .731$ $K = .001 X + .557$ $HCO_3 = .519 X - 4.277$ $SO_4 = .022 X + 4.909$ $Cl = .028 X - 1.013$ $NO_3 = .006 X + .353$	.9948 .9615 .7438 .5366 .0710 .9536 .2662 .4619 .1893	$S = .785 X - 1.26 * 10^{-4} X^2$ $Ca = .161 X - 1.08 * 10^{-4} X^2$ $Mg = .0238 X - 1.85 * 10^{-5} X^2$ $Na = .00722 X + .926 * 10^{-4} X^2$ $K = .0103 X - 4.02 * 10^{-5} X^2$ $HCO_3 = .469 X - 1.31 * 10^{-4} X^2$ $SO_4 = .094 X - 2.49 * 10^{-4} X^2$ $Cl = .00567 X + 1.09 * 10^{-4} X^2$ $NO_3 = .0146 X - 4.34 * 10^{-5} X^2$	.9949 .9631 .7466 .5595 .2075 .9518 .2353 .4790 .2191
Chateauguay 03020 A 70 mesures	$S = .695 X + 10.1$ $Ca = .0589 X + 16.3$ $Mg = .0103 X + 3.81$ $Na = .114 X - 20.4$ $K = .00459 X + .875$ $HCO_3 = .356 X + 6.97$ $SO_4 = .0365 X + 19.6$ $Cl = .109 X - 17.5$ $NO_3 = .00585 X + .503$	.9887 .6372 .2872 .7905 .4949 .9090 .2332 .8504 .2534	$S = .753 X - .665 * 10^{-4} X^2$ $Ca = .171 X - 1.75 * 10^{-4} X^2$ $Mg = .0370 X - 4.27 * 10^{-5} X^2$ $Na = -.0329 X + 2.41 * 10^{-4} X^2$ $K = .00916 X - 4.39 * 10^{-6} X^2$ $HCO_3 = .390 X - 2.80 * 10^{-5} X^2$ $SO_4 = .180 X - 2.41 * 10^{-4} X^2$ $Cl = -.0116 X + 1.89 * 10^{-4} X^2$ $NO_3 = .00946 X - .589 * 10^{-5} X^2$	.9879 .7738 .4187 .9162 .3890 .9059 .5083 .9198 .2628
Ste-Anne 05040 A 61 mesures	$S = .758 X - .754$ $Ca = .0774 X + 1.01$ $Mg = .0285 X - .423$ $Na = .103 X - 1.29$ $K = .0127 X + .112$ $HCO_3 = .229 X + 1.67$ $SO_4 = .154 X + .251$ $Cl = .0997 X - 1.78$ $NO_3 = .0436 X - .300$	.9388 .5143 .4279 .7569 .2235 .4264 .4402 .4688 .2308	$S = .723 X + 2.25 * 10^{-4} X^2$ $Ca = .162 X - 1.70 * 10^{-3} X^2$ $Mg = .00842 X + .768 * 10^{-3} X^2$ $Na = .00357 X + 1.83 * 10^{-3} X^2$ $K = .0212 X - 1.56 * 10^{-4} X^2$ $HCO_3 = .401 X - 4.01 * 10^{-3} X^2$ $SO_4 = .180 X - 2.27 * 10^{-4} X^2$ $Cl = .0428 X + 2.75 * 10^{-3} X^2$ $NO_3 = .00738 X + .914 * 10^{-3} X^2$	.9381 .5507 .4824 .7727 .2245 .4613 .4397 .5035 .2622
Chamouchouane 06190 A 46 mesures	$S = 1.00 X - 7.01$ $Ca = .160 X - .954$ $Mg = .0361 X - .481$ $Na = .0437 X - .485$ $K = .0326 X - .597$ $HCO_3 = .553 X - 3.14$ $SO_4 = .131 X - 1.43$ $Cl = .0372 X - .897$ $NO_3 = -.00303 X + .963$	.9588 .6562 .3285 .8524 .6460 .9045 .4792 .3862 .0176	$S = .565 X + .663 * 10^{-2} X^2$ $Ca = .119 X + 3.63 * 10^{-4} X^2$ $Mg = -.00429 X + .761 * 10^{-3} X^2$ $Na = .0123 X + 4.95 * 10^{-4} X^2$ $K = -.00523 X + .584 * 10^{-3} X^2$ $HCO_3 = .389 X + 2.34 * 10^{-3} X^2$ $SO_4 = .0241 X + 1.89 * 10^{-3} X^2$ $Cl = -.0207 X + .908 * 10^{-3} X^2$ $NO_3 = .0501 X - .706 * 10^{-3} X^2$	.9597 .6473 .3763 .8625 .6573 .8999 .5055 .4056 .1041
Harricana 08010 A 56 mesures	$S = .772 X - 3.11$ $Ca = .133 X - .00909$ $Mg = .0345 X - .972$ $Na = .0245 X + .293$ $K = -.00335 X + 1.22$ $HCO_3 = .407 X - 6.98$ $SO_4 = .170 X + 1.00$ $Cl = -.00117 X + 1.71$ $NO_3 = .00789 X + .633$	.9399 .7621 .4078 .6552 .1085 .7349 .4947 .0106 .0557	$S = .667 X + .849 * 10^{-3} X^2$ $Ca = .125 X + 1.11 * 10^{-4} X^2$ $Mg = .0122 X + 1.14 * 10^{-4} X^2$ $Na = .0332 X - .624 * 10^{-4} X^2$ $K = .0273 X - 1.82 * 10^{-4} X^2$ $HCO_3 = .203 X + 1.45 * 10^{-3} X^2$ $SO_4 = .202 X - 2.58 * 10^{-4} X^2$ $Cl = .0489 X - 3.58 * 10^{-4} X^2$ $NO_3 = .0150 X + 3.32 * 10^{-5} X^2$	.9423 .7640 .3867 .6599 .2982 .7441 .4969 .1479 .0317

TABLEAU V - RELATION CONDUCTIVITE - CONCENTRATION

- ACKERMAN W.C., HARMESON R.H., SINCLAIR R.A. (1970)... Some long-term trends in water quality of rivers and lakes. Eos, Trans. Am. Geoph. Union, 51, 6, 516-522.
- ALEKIN O.A., BRAZNIKOVA L.V. (1957)... New data on the discharge of dissolved substances from the territory of the USSR. Dokl. Akad. Nauk SSSR 114, 1-6 (in Russian).
- ALEKIN O.A., BRAZNIKOVA L.V. (1960)... Contribution à la connaissance de l'écoulement des substances dissoutes de la surface terrestre du globe (traduit du russe). Hidrochim. Mat. 32, 12-24 (in Russian).
- ALEKIN O.A., BRAZNIKOVA L.V. (1962)... Sur la corrélation entre le transport ionique et celui des substances en suspension (traduit du russe). Dokl. Acad. Nauk. SSSR 146, 1, 203-206 (in Russian).
- ALEKIN O.A., BRAZNIKOVA L.V. (1966)... Removal of solutes from continents by rivers and the relationship of this process to the mechanical erosion of the earth's surface. In Chemistry of the Earth crust vol 1, 291-303.
- ALEKIN O.A., BRAZNIKOVA L.V. (1968)... Dissolved matter discharge and mechanical and chemical erosion. Ass. Int. Hydrol. Sci publ 78, 35-41 (in English).
- DOUGLAS I. (1964)... Intensity and periodicity in denudation processes with special reference to the removal of material in solution by rivers. Zeitschrift geomorphologie 8, 4, 453-472.
- FAIRBRIDGE R.W. (1968)... Encyclopedia of geomorphology. Rheinhold Book Corp. New York 1295 pp.
- GOUDIE A. (1970)... Input and output considerations in estimating rates of chemical denudation. Earth Science journal 4, 59-65.
- ZVEREV V.P. (1971)... La balance hydrochimique du territoire de l'URSS. Dokl. Akad. Nauk. SSSR., 198, 1, 161-163.