

A

EARTHQUAKE RISK AT GROS CACOUNA, QUEBEC,  
AND MELFORD POINT, NOVA SCOTIA

P.W. Basham

P. Morel-à-l'Huissier

F.M. Anglin

Earth Physics Branch  
Energy, Mines and Resources Canada

Earth Physics Branch Open File Number 82-2

Ottawa, Canada 1982

iii + 51 pp. and 17 figures

Price: \$33.00

Not for Reproduction

EPB  
Open File  
82-2 c.2

This document was produced  
by scanning the original publication.

Ce document est le produit d'une  
numérisation par balayage  
de la publication originale.

EARTHQUAKE RISK AT GROS CACOUNA, QUEBEC, AND MELFORD POINT, NOVA SCOTIA.

Executive Summary

One of the factors to be considered in the design and construction of an LNG terminal is earthquake risk - the potential for severe earthquake effects that may cause damage to the terminal facilities, spillage of LNG and dispersion of flammable gas, with attendant hazards to the public and economic loss. This report presents a review of earthquake risk at Gros Cacouna, Quebec and Melford Point, Nova Scotia, the two eastern Canada locations being considered as potential sites for an LNG regasification terminal as part of the Arctic Pilot Project. The new seismic risk maps of eastern Canada, part of the national maps that will be employed to develop new seismic zoning maps for the 1985 edition of the National Building Code, provide the regional framework. Additional seismological and geological information are then employed to derive design seismic ground motion that complies with the provisions of the CSA Standard for LNG facilities.

The earthquake risk at Gros Cacouna and Melford Point differs substantially because Gros Cacouna is near to the most active earthquake zone in eastern Canada, whereas Melford Point is in a region of very low historic and recent seismicity, but affected by distant earthquake sources. However, for both sites a large amount of judgement is required to estimate low-probability seismic ground motion produced by large earthquakes in the region.

(ii)

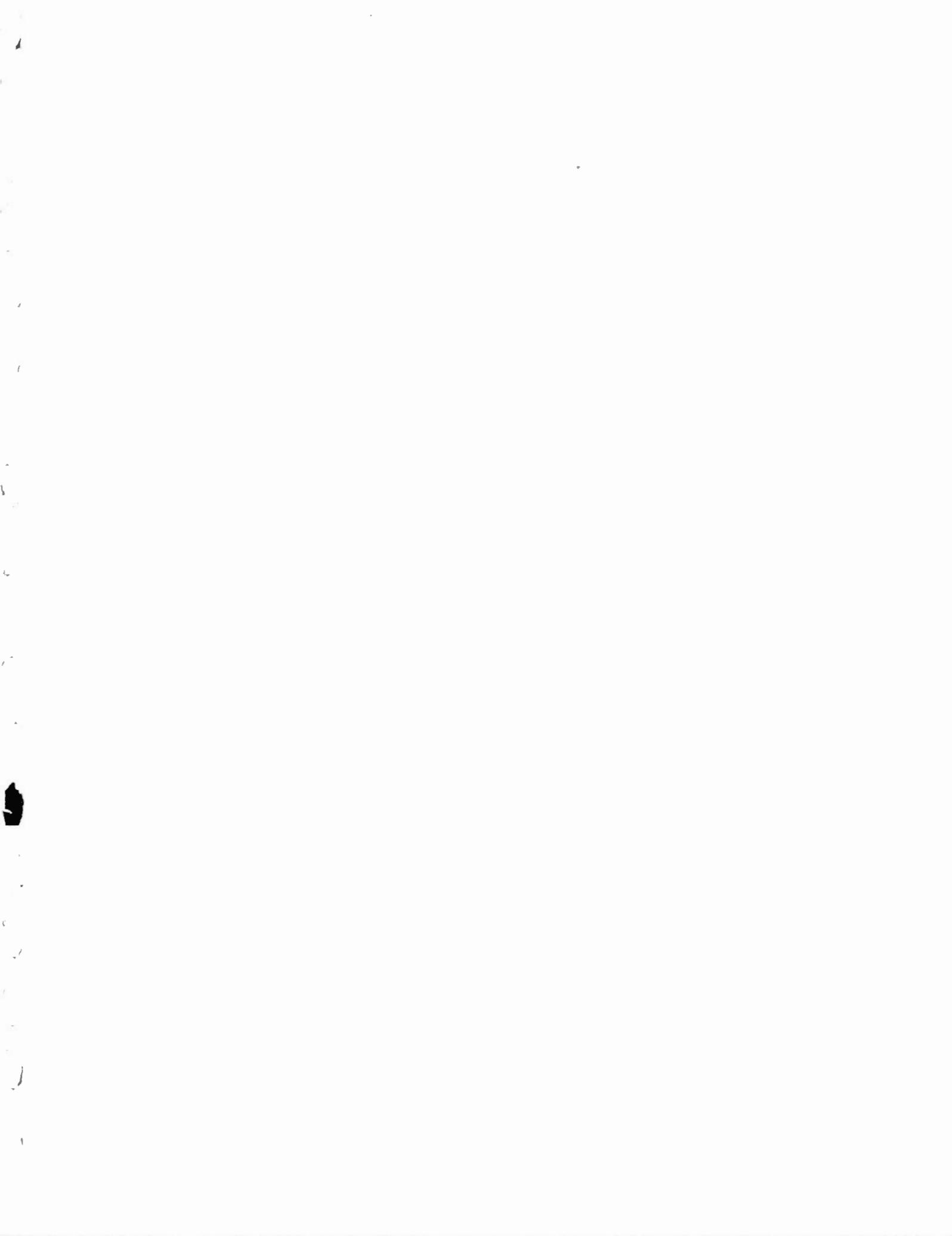
For Gros Cacouna, a representative design ground motion for critical facilities is developed by extrapolating western U.S. strong motion recordings to eastern Canadian conditions to produce what is judged to be the maximum credible effects at Gros Cacouna that would be produced by a large earthquake in the Charlevoix zone. The ground motion can be characterized by a peak horizontal acceleration of about 60% g in the higher frequency range. For Melford Point, it is demonstrated that the maximum credible ground motion that would be produced by the dominant earthquake source, the Grand Banks zone, can be characterized by a peak horizontal acceleration of about 13% g. Thus, judging by relative levels of design ground motion, the earthquake risk at Gros Cacouna is about 5 times greater than at Melford Point.

These derivations have been made without knowledge of any unusual local site conditions that may be encountered at Gros Cacouna or Melford Point, conditions that would necessitate further modifications before the results could be used in engineering design. In addition, the assessment has been made without knowledge of the dominant resonant frequencies of critical LNG terminal facilities; additional research may be required, particularly if some facilities respond predominantly to low frequency ground motion.

Earthquake Risk at Gros Cacouna, Quebec, and Melford Point, Nova Scotia.

Contents

	Page
Executive Summary-----	i
1. INTRODUCTION-----	1
2. SEISMICITY OF EASTERN CANADA-----	3
2.1 Significant Canadian Earthquakes-----	3
2.2 Eastern Canadian Earthquakes 1661-1979-----	5
2.3 Seismicity and Geology in the Region of Gros Cacouna, Quebec-----	7
2.4 Seismicity and Geology in the Region of Melford Point, Nova Scotia -----	10
3. PROBABILISTIC STRONG SEISMIC GROUND MOTION IN EASTERN CANADA-----	13
3.1 1970 Seismic Zoning Map-----	13
3.2 Current Seismic Risk Methodology-----	15
3.3 Earthquake Source Zones in Eastern Canada-----	18
3.4 Peak Horizontal Acceleration and Velocity in Eastern Canada at a Probability of Exceedence of 10% in 50 years-----	18
4. EARTHQUAKE RISK AT GROS CACOUNA, QUEBEC-----	22
4.1 Probabilistic Seismic Ground Motion-----	22
4.2 Deterministic Seismic Ground Motion-----	25
4.3 Development of Design Ground Motion-----	34
5. EARTHQUAKE RISK AT MELFORD POINT, NOVA SCOTIA -----	40
5.1 Probabilistic Seismic Ground Motion-----	40
5.2 Deterministic Seismic Ground Motion-----	42
6. CONCLUSIONS-----	46
ACKNOWLEDGEMENT-----	48
REFERENCES-----	49



## 1. INTRODUCTION

The Arctic Pilot Project is a proposal to transport natural gas by pipeline from fields in northeastern Melville Island to a liquefaction terminal at Bridport Inlet, where the liquefied natural gas (LNG) will be loaded into icebreaker LNG carriers and transported to a receiving terminal in eastern Canada. The southern regasification terminal would be located either at Gros Cacouna, Quebec, or Melford Point, Nova Scotia.

One of the factors to be considered in the design and construction of a regasification terminal is earthquake risk - the potential for severe earthquake effects that may cause damage to the terminal facilities, spillage of LNG and dispersion of flammable gas, with attendant hazards to the public and economic loss.

Earthquake risk assessments for the Gros Cacouna and Melford Point locations have been made for TransCanada Pipelines, the owner and operator of the proposed receiving terminal, by Fenco Consultants Ltd. (1980a,b; 1981a,b). As part of the Energy, Mines and Resources consideration of these two locations as sites for the receiving terminal, the Earth Physics Branch (EPB) was asked to undertake an independent review of earthquake risk. It is the purpose of this report to present the results of this review.

The requirements for earthquake-resistant design of common buildings in Canada are included in the provisions of the National Building Code (National Research Council, 1980, a, b) which refers to the 1970 Seismic Zoning Map of Canada. The 1970 zoning map, which displays peak horizontal acceleration at a probability of exceedence of 0.01 per annum, was developed by the EPB in the late 1960's (Milne and Davenport, 1968; Whitham et al., 1970). Sufficient new information on earthquakes in Canada and methods of estimating earthquake risk has become available in the last decade that the EPB is now engaged in a

research project to produce new seismic risk maps which display both peak horizontal ground acceleration and velocity (Basham et al., 1982). Under the schedule of revision of the National Building Code, it is envisaged that this new information will appear as new zoning maps in the 1985 edition of the code.

The EPB risk maps display simple seismic ground motion parameters suitable for assessing, in a number of broad zones, the relative levels of earthquake risk across Canada. As such, they are intended to have equal validity at all sites in the country. They do, however, provide a regional framework and a starting point for risk assessment at specific sites for special structures or facilities, and they will be used in this report as starting points for earthquake risk assessment at Gros Cacouna and Melford Point.

LNG facilities do not fall within the normal provisions of the National Building Code. These, and other critical facilities that may pose greater hazards than common buildings should they fail under earthquake loading, require a more rigorous assessment of earthquake risk and regulations usually impose more severe design requirements. Adequate assurance against earthquake-induced failure is usually achieved by requiring facilities to withstand low-probability earthquake shaking. The choice of an appropriate probability is a socio-economic decision, i.e., a trade-off between absolute safety and the economic penalty of attempting to design and construct a facility that will withstand extremely unlikely earthquake effects.

The EPB cannot enter this socio-economic debate between the proponent and the regulator. Rather, this review is intended to make appropriate seismological information and research results available to interested agencies.

In the following we briefly review the seismicity of eastern Canada and the methods used to derive the eastern Canada portion of the new seismic risk maps. Attention is then turned to a more rigorous assessment of strong seismic ground motion that may be experienced at Gros Cacouna and Melford Point.

## 2. SEISMICITY OF EASTERN CANADA

### 2.1 Significant Canadian Earthquakes

To put the regions and sites under consideration into context with respect to Canadian seismicity, Figure 1 is included to show the distribution of the more significant historic earthquakes in Canada and adjacent regions. Clearly, the west coast of Canada has experienced the greatest number of large magnitude earthquakes, the largest, magnitude 8.1, occurring west of the Queen Charlotte Islands in 1949.

The earthquakes off the coast of western Canada reflect brittle deformation occurring in response to movement between the two large lithospheric Pacific and North America plates. Right-lateral, strike-slip faulting is dominant along the coasts of California (San Andreas fault) and northern British Columbia (Queen Charlotte fault zone). Between northern California and the northern end of Vancouver Island, the Pacific and North America plates are separated by a series of small oceanic plates that are being subducted beneath the North American continent. This tectonic complexity has produced earthquakes as large as magnitude 7 in regions of Vancouver Island and Puget Sound.

The earthquakes of eastern Canada are occurring in an intra-plate environment that is much less well understood tectonically. Earthquakes in the Precambrian Shield and Appalachian regions appear to be occurring in

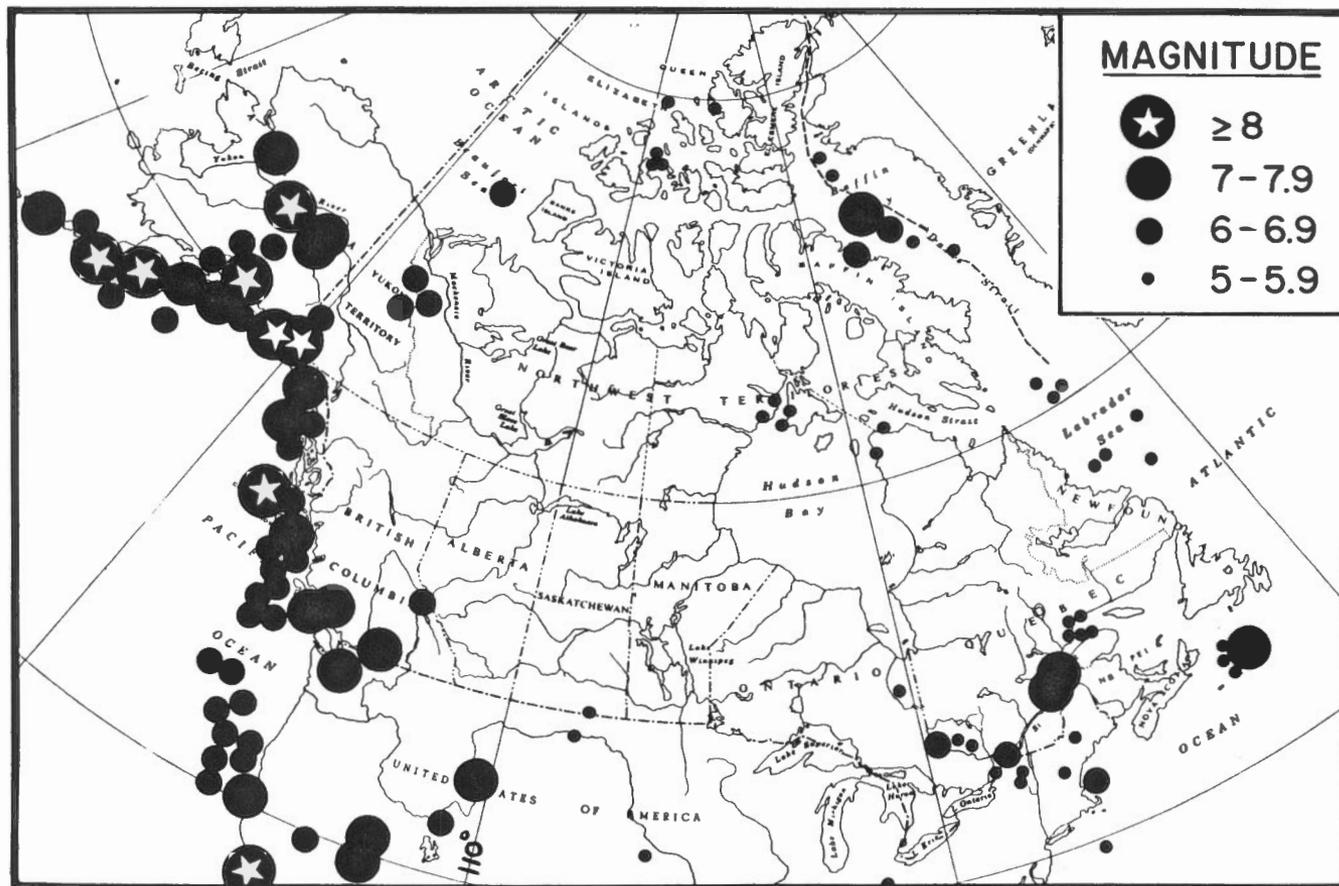


Figure 1. A schematic representation of significant historic earthquakes in Canada and adjacent regions. Epicentre symbols for the larger magnitude earthquake obscure numerous events of lower magnitude. Earthquakes in the magnitude 5 range are shown only for the region east of longitude  $110^{\circ}\text{W}$ .

ancient zones of crustal weakness in response to the contemporary stress field. However, the zones of weakness and the origins of the stress field are neither well-understood nor well-defined (Hasegawa and Adams, 1981).

On the eastern and northern continental margins most of the earthquakes are assumed to be occurring in the old rifted continental lithosphere formed when continental masses separated to form the Atlantic Ocean. However, the number of earthquakes accurately located during the era of instrumental seismology are too few to delineate anything but broad patterns, and the geologic features on the margin are too poorly mapped to be associated with the more significant historic earthquakes (Page and Basham, 1982).

## 2.2 Eastern Canadian Earthquakes 1661-1979

Figure 2 shows the seismicity of eastern Canada and the adjacent region of the northeastern U.S. with a selection of earthquakes from the "Canadian Earthquake Epicentre File", a master file on digital tape maintained by the EPB.

The epicentres of all earthquakes in the file with magnitudes greater than 5.0 are shown in the plot. The earliest event in this category is near Boston in 1568; the earliest on Canadian territory is near Montreal in 1661. Earthquakes in magnitude ranges less than 5 are restricted to those reported in the last three decades. This avoids possibly very inaccurate epicentres of earlier events reported felt in single locations, and is a better reflection of the capabilities of the seismograph network as it developed to its current configuration.

The distribution of seismicity in the earliest years shows concentrations of events in the regions first settled, e.g., near Boston and Montreal. Epicentral locations based on isoseismal information and early

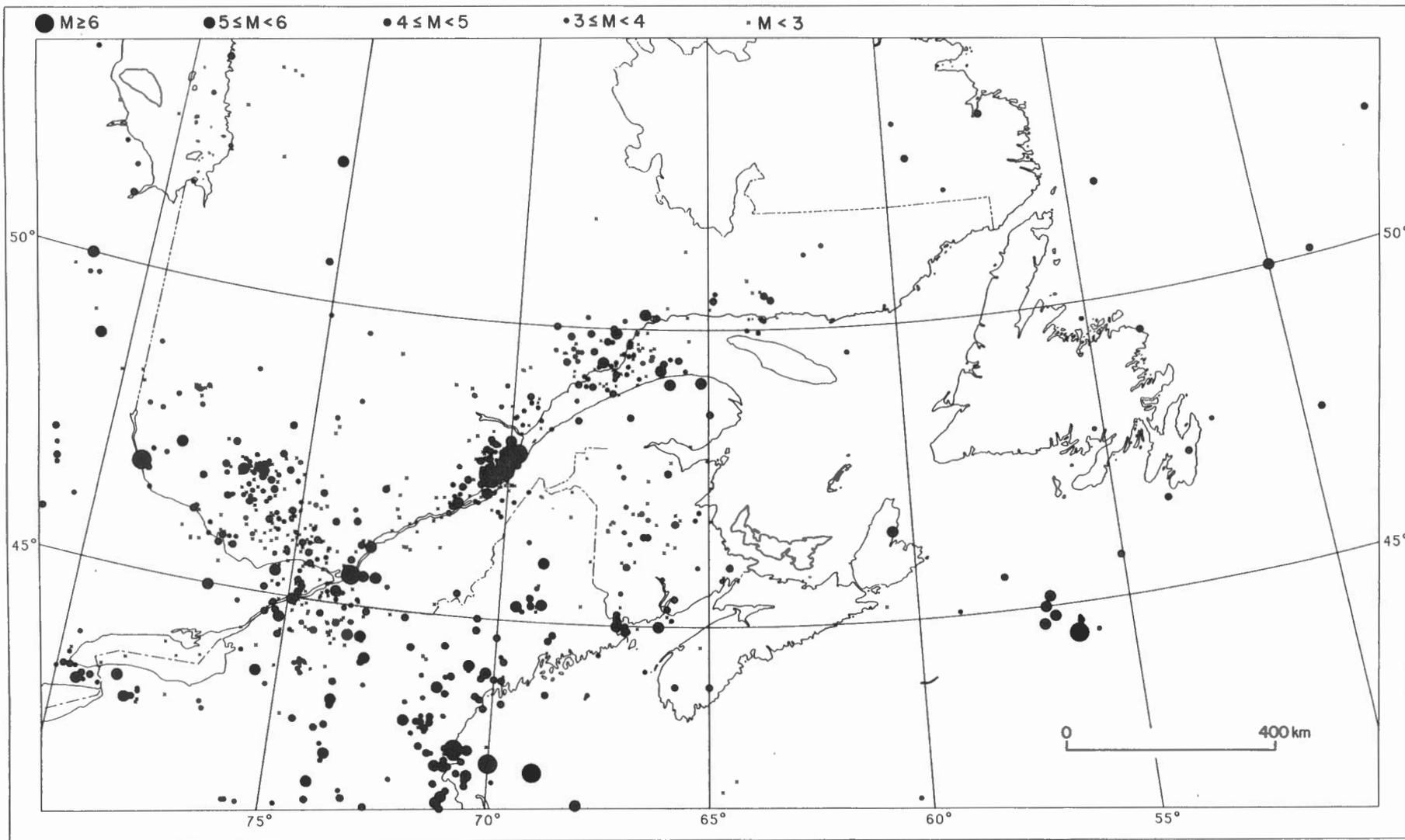


Figure 2. Seismicity of eastern Canada. Earthquakes with magnitudes 4-5, 3-4, and less than 3 are shown for time periods since 1950, 1960 and 1970, respectively.

seismographic observations are less accurate than has been possible with the modern seismograph network of the last two decades. Nevertheless, Figure 2 is a useful depiction of the general distribution of historic and recent seismicity. More careful assessment of the completeness of reporting of the various magnitude categories, which varies throughout the map area of Figure 2, is required for modelling the earthquake source zones for earthquake risk estimation (Basham et al., 1979; with further modification by Basham et al., 1982). Note, for example, that the current seismograph network in eastern Canada cannot locate many earthquakes with magnitudes less than 4 in the offshore area.

The general distribution of seismicity in eastern Canada has been described recently by Basham et al. (1979) and will not be repeated here. However, those earthquake zones most relevant to the purposes of this report are described briefly in the following two sections.

### 2.3 Seismicity and Geology in the Region of Gros Cacouna, Quebec

Gros Cacouna (Figure 3) is located on the south shore of the St. Lawrence River about 10 km downstream from Riviere-du-Loup and 150 km northeast of Quebec City. The zone of earthquakes that occurs in the region between Quebec City and the mouth of the Saguenay River, historically the most active zone in eastern Canada, is referred to as the Charlevoix zone. The epicentre plot in Figure 3 shows that the greatest concentration of earthquakes has occurred in the distance range of about 25 to 100 km from Gros Cacouna. This zone will have the greatest influence on the estimates of earthquake risk at Gros Cacouna and will be discussed in greater detail in later sections.

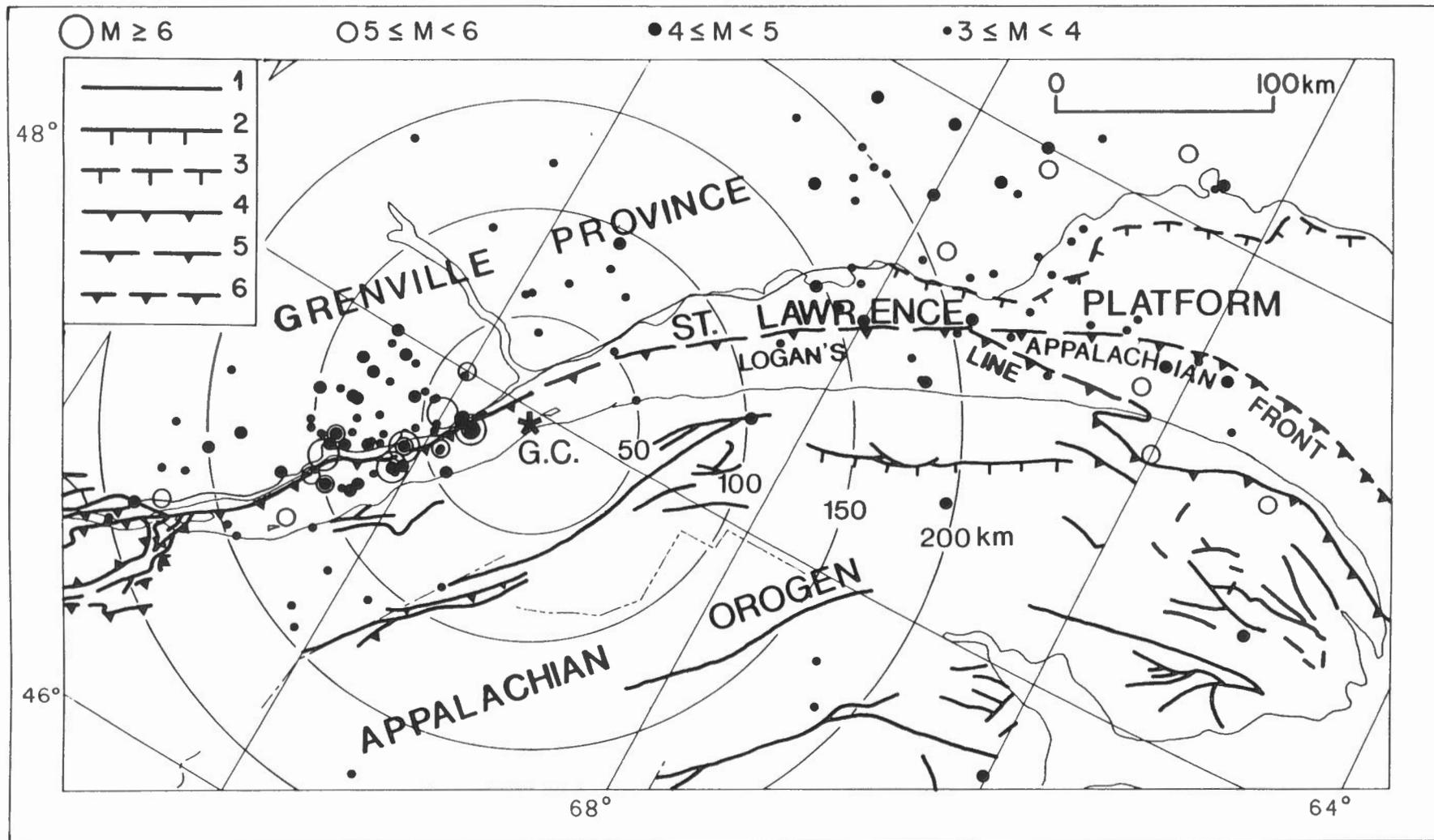


Figure 3. Seismicity and geology in the region of Gros Cacouna, Quebec (G.C.). Epicentre symbols for magnitude (M) classes are shown on the upper border; time period restrictions on magnitudes 3 to 5 as in Figure 2. 1 - fault; 2 - normal fault; 3 - inferred normal fault; 4 - thrust fault; 5 - approximate thrust fault; 6 - inferred thrust fault (Sanford et al., 1979).

Further downstream, at distances beyond about 150 km, is a more diffuse cluster of epicentres centred approximately over the north shore in the region between Baie-Comeau and Sept-Iles. This region, referred to as the Lower St. Lawrence Zone, has not experienced an historic earthquake with magnitude of 6 or greater. However, in recent years its rate of lower magnitude earthquakes has been similar to that of the Charlevoix zone. Elsewhere in eastern Canada (see Figure 2) the clusters of seismicity are sufficiently distant from Gros Cacouna that they will have little influence on earthquake risk assessment.

The three geological domains shown in Figure 3 are the Grenville to the northwest, the Appalachian (Taconic) to the southeast, and the St. Lawrence Platform between the two. The Grenville consists mainly of highly deformed Upper Precambrian granitic and gneissic rocks, while the St. Lawrence Platform consists of Paleozoic sediments lying on the Precambrian. The Appalachian domain is a sequence of folded Paleozoic sediments that includes some thrust sheets. A major structural feature of the region is Logan's Line that, within the St. Lawrence River, is associated with Appalachian front, but diverts from the front to enter the Gaspé Peninsula.

The seismicity in general appears to be concentrated along the contact between the Grenville and Appalachian domains, with a majority of the events occurring within the Precambrian rocks, but no major structural features have been mapped in the Grenville terrain northeast of the Saguenay River. (The Charlevoix zone southwest of the Saguenay is treated in detail in a later section.). However, major structural features mapped in the Appalachian terrain have a nebulous association with scattered epicentres.

Figure 3 shows no major structures at Gros Cacouna. Fenco Consultants Ltd. (1980a) commissioned a preliminary geological reconnaissance of the Gros Cacouna site that inferred no faulting within the proposed site boundaries. Although this information is not definitive, there is no evidence known to the present authors that would suggest significant earthquakes have occurred in the immediate vicinity of Gros Cacouna, i.e., earthquakes that are not reflected in our current understanding of historic and recent regional seismicity patterns.

#### 2.4 Seismicity and geology in the Region of Melford Point, Nova Scotia

Melford Point (Figure 4) is located on the western shore of the Strait of Canso, about 10 km from Port Hawkesbury. The nearest earthquake to Melford Point in the selection of earthquakes plotted in Figure 4 is the event in northern Cape Breton with an assigned epicentre of 46.5°N, 60.5°W. This event occurred on 19 December 1909 and has a location uncertainty of at least 50 km. It was reported felt throughout Cape Breton and Smith (1962) assigned an epicentral intensity VI. When the Canadian Earthquake Epicentre File was prepared in the early 1970's all earthquakes were assigned magnitudes; in the case of this earthquake by converting from epicentral intensity to the magnitude 5.0 plotted in Figure 4. This earthquake received a preliminary reassessment as part of the review of eastern Canadian seismicity by Basham et al. (1979). The area over which it was felt, "throughout Cape Breton", was considered a more accurate indicator of its size and the magnitude reduced to 4.0 (see Table 1 of Basham et al., 1979).

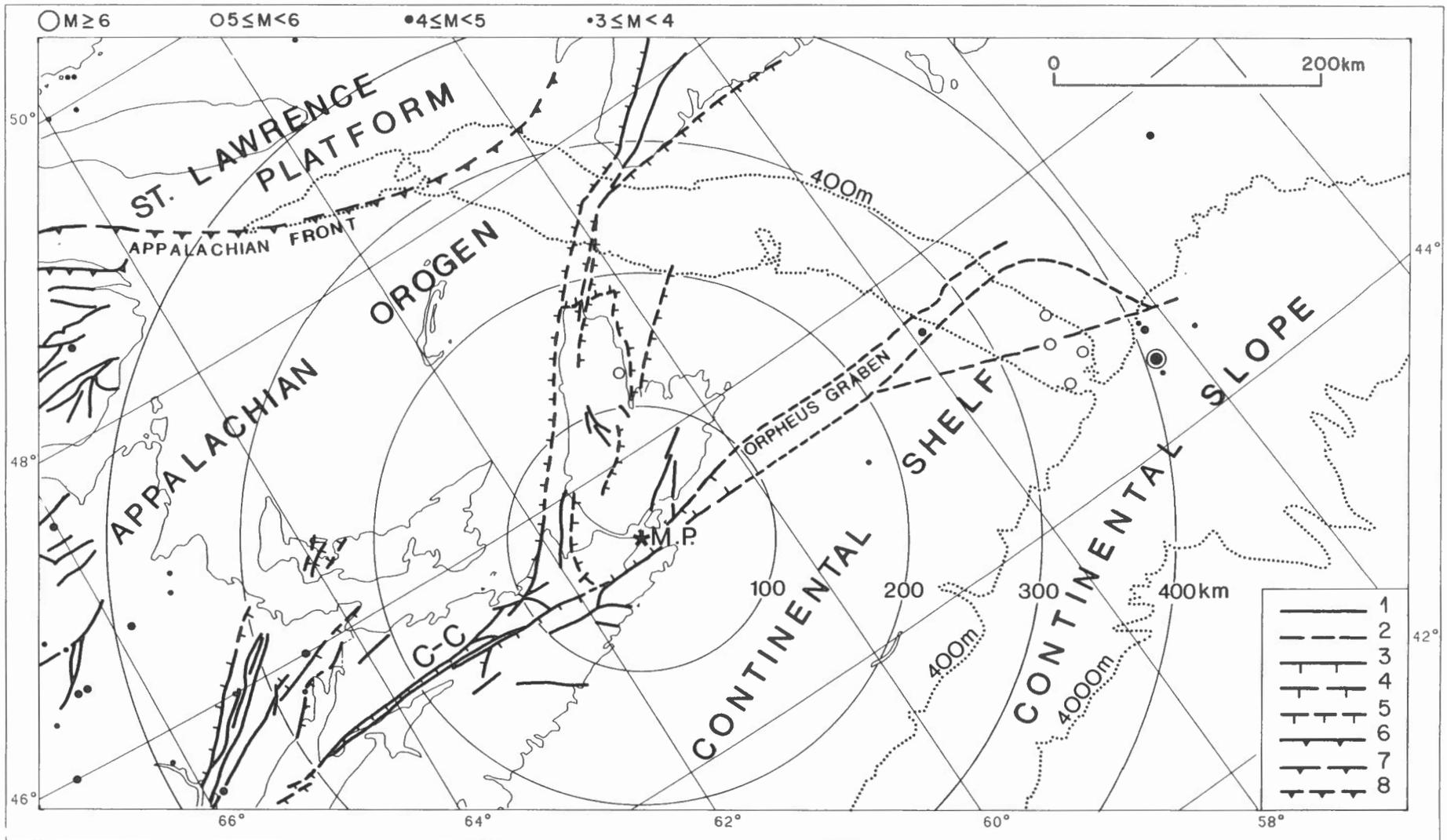


Figure 4. Seismicity and geology in the region of Melford Point, Nova Scotia (M.P.). Epicentre symbols for magnitude (M) classes are shown on the upper border; time period restrictions on magnitude 3 to 5 as in Figure 2. 1 - fault; 2 - inferred fault; 3 - normal fault; 4 - approximate normal fault; 5 - inferred normal fault; 6 - thrust fault; 7 - approximate thrust fault; 8 - inferred thrust fault (Sanford et al., 1979; King and MacLean, 1976). The 400m and 4000m isobaths mark the edge of the continental shelf and the base of the continental slope, respectively. C-C is the Cobequid - Chedabucto fault zone.

Beyond Cape Breton, which in a later section will be shown as part of a low seismicity eastern Canadian "background" zone, the significant historical earthquakes have been on the Grand Banks south of Newfoundland, about 350 km from Melford Point, and in New Brunswick at distances beyond about 250 km (see also Figure 2). It will be shown in a later section that the Grand Banks zone has the greatest influence on estimates of earthquake risk at Melford Point.

The region of Figure 4 is almost completely within the Canadian Appalachians that are formed of folded Paleozoic sediments, volcanics and intrusives. Three major phases of deformation have affected the region: the Taconic (Ordovician), Acadian (Devonian) and Hercynian (Permo-Carboniferous). The major structural feature of the region, the Cobequid-Chedabucto fault zone (Triassic or older), runs within about 20 km of Melford Point. This fault zone extends offshore from Chedabucto Bay to the Laurentian Channel along the Orpheus Graben formed of folded Cretaceous strata (King and Maclean, 1970, 1976; King et al., 1970).

Low level seismicity can be spatially associated with mapped northeast trending structures north of the Bay of Fundy (Figure 4). However, a northeast seismicity trend occurs within the eastern part of the thin Late Paleozoic basin of central New Brunswick where no major rupture structures are mapped. Such seismicity may be spatially associated with structures buried beneath the basin. No known seismicity has been associated with the Cobequid-Chedabucto fault zone.

King et al. (1970) suggest that seismicity in the Grand Banks zone could be due to adjustment along the eastern end of the southern fault of the Orpheus Graben, the offshore extension of the Cobequid-Chedabucto fault zone. However, the Grand Banks epicentres are not sufficiently accurate to make a definitive correlation.

In a preliminary geological reconnaissance of the Melford point site, Fenco Consultants Ltd. (1980b) found northeast trending faults, with no evidence of recent movement, which may be a local expression of the larger fault system on southern Cape Breton (Figure 4). In summary, there is no recent geological evidence to suggest significant future earthquakes in the vicinity of Melford Point.

### 3. PROBABILISTIC STRONG SEISMIC GROUND MOTION IN EASTERN CANADA.

#### 3.1 1970 Seismic Zoning Map

The current (1980) edition of the National Building Code of Canada (National Research Council, 1980a) employs the 1970 Seismic Zoning Map (Figure 5) to set relative levels of earthquake risk throughout the country for use in earthquake-resistant design provisions. Figure 5 depicts peak horizontal acceleration with a probability of exceedence of 0.01 per annum, and is contoured at levels of 1, 3 and 6% g to divide the country into four seismic risk zones. During the past decade the EPB has provided as a service to users of this map, calculations of the peak horizontal acceleration at any specific site. This has been particularly important in regions of zone 3 where the accelerations can be substantially greater than the lower bound contour level of 6% g.

The design loads that result from the static provisions of the code were originally calibrated empirically against experience based on building practice in California. The probability level used as a basis for the zoning map, 0.01 per annum or 40% probability of exceedence in 50 years, is not, however, representative of the seismic design loads specified by the code; i.e., the design loads will have a lower, but unspecified probability of being exceeded. It is for this reason that the probability adopted for the map

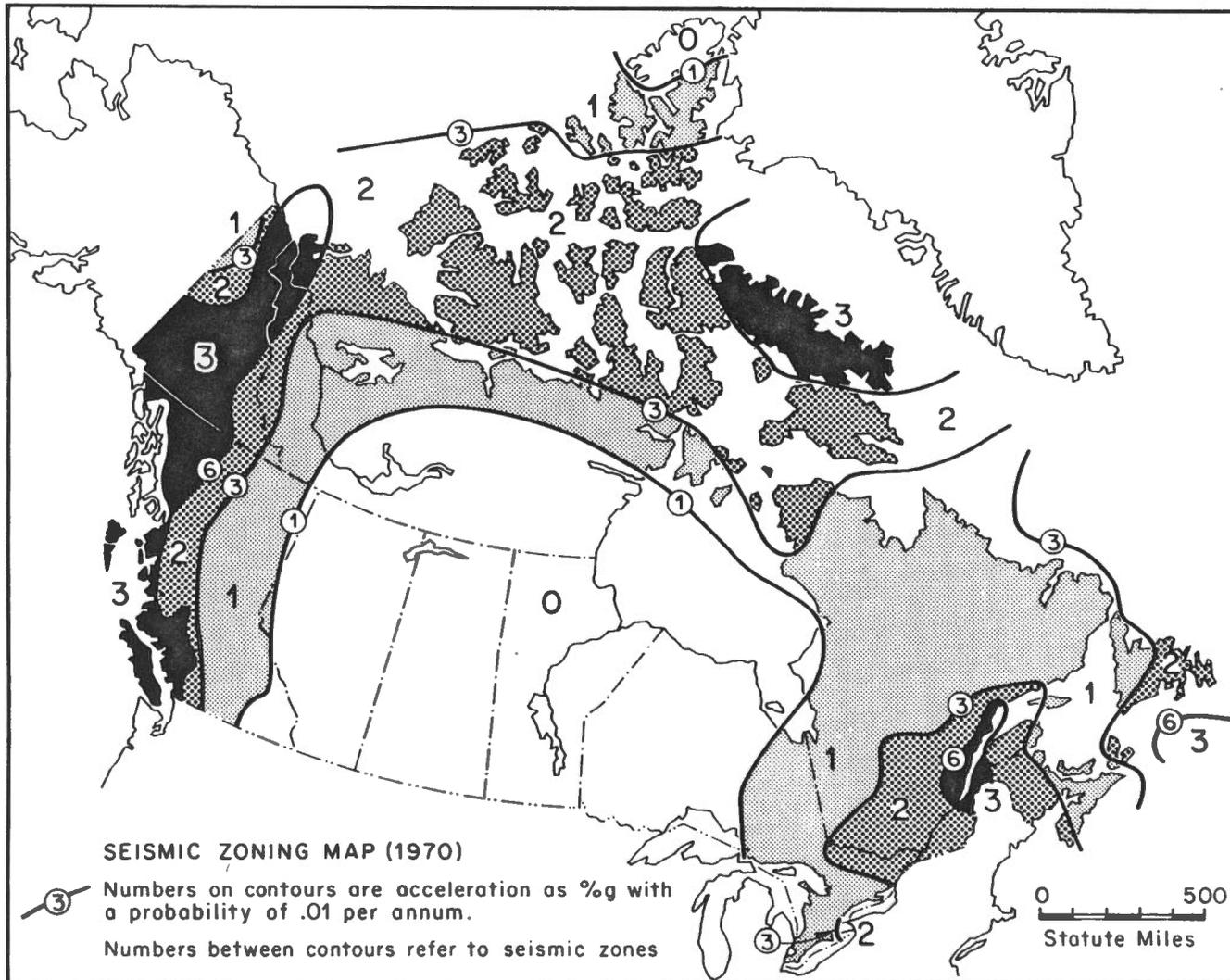


Figure 5. 1970 Seismic Zoning Map of Canada.

should be considered as a somewhat arbitrary base that is useful for assessing relative risk levels across the country.

However, peak accelerations displayed on the zoning map, or site-specific calculations of equivalent information, are frequently used in non-code applications in the mistaken belief that this will result in levels of protection comparable to that afforded by the code. For the reasons given above, this is not the case.

The state-of-the-art in normal engineering practice is not such that the concept of probability can be carried through the whole design process. However, experience suggests that 10% probability of exceedence in 50 years is more nearly appropriate to the effective design levels specified by the current code. This probability has therefore been chosen for the new probabilistic ground motion maps prepared by EPB (Basham et al., 1982), which will form the basis for new seismic zoning maps for the 1985 edition of the National Building Code.

### 3.2 Current Seismic Risk Methodology

The 1970 zoning map was developed using an extreme-value method applied to historic seismicity to compute probabilities of acceleration exceedence at a grid of sites throughout the country (Milne and Davenport, 1968). A recent review of methods of estimating seismic risk (Weichert and Milne, 1979) has shown that the method developed by Cornell (1968) would be more appropriate for the preparation of new maps. In particular, the Cornell method enables the incorporation of geological information, when available, to define earthquake source zones with finite dimensions; in contrast, the extreme-value method implicitly assumes that future large earthquakes will occur in the same locations as the historic events.

A schematic description of the current method is given in Figure 6. The region under consideration is divided into a set of earthquake source zones based on the distribution of historic and recent earthquakes and any geologic or tectonic evidence that can be employed to delineate the extent of future earthquake activity (Figure 6a). For each of the zones magnitude recurrence relations are developed (Figure 6b) based on estimated rates of past earthquakes. We have used the method of Weichert (1980) to derive relations in the form

$$N(>M) = N_0 e^{-\beta M} (1 - e^{-\beta(M_x - M)}) \quad (1)$$

where  $N$  is the cumulative number of earthquakes per annum greater than or equal to magnitude  $M$ . The term on the right of equation (1) terminates the cumulative relation at an upper bound magnitude  $M_x$ .

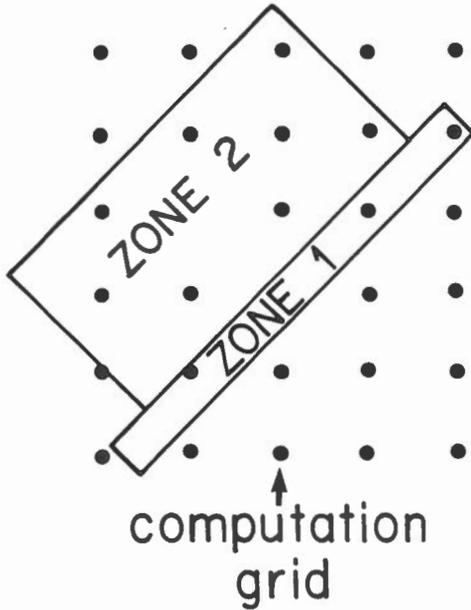
Attenuation relations that predict ground motion as a function of magnitude and distance (Figure 6c) are required for the ground motion parameters being mapped. The EPB maps display both peak horizontal acceleration ( $a_p$ ) and velocity ( $v_p$ ) using attenuation relations developed by Hasegawa et al. (1981). For eastern Canada these relations have the form

$$a_p \text{ (cm s}^{-2}\text{)} = 3.4 e^{1.3M} R^{-1.1} \quad (2)$$

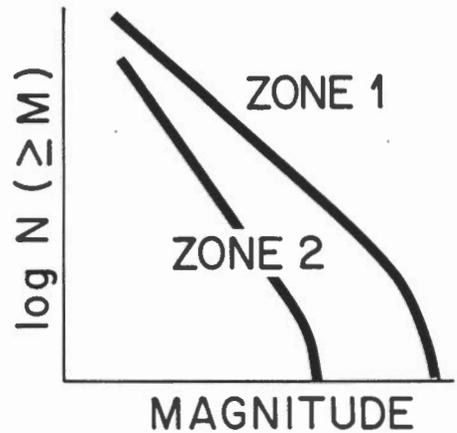
$$v_p \text{ (cm s}^{-1}\text{)} = 0.00018 e^{2.3M} R^{-1.0} \quad (3)$$

where  $R$  is hypocentral distance; earthquakes in all source zones in eastern Canada are restricted to occur at a focal depth of 20 km for purposes of probabilistic ground motion mapping.

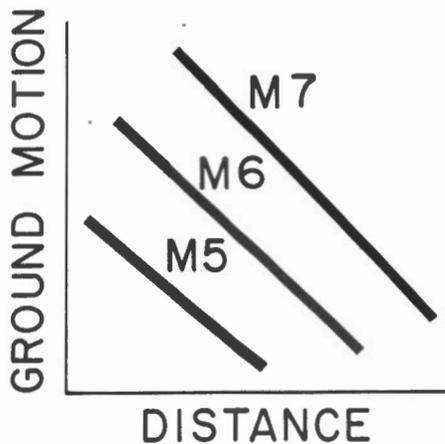
(a)  
EARTHQUAKE  
SOURCE ZONES



(b)  
MAGNITUDE  
RECURRENCE



(c)  
GROUND MOTION  
ATTENUATION



(d)  
SITE OR GRID  
CALCULATION

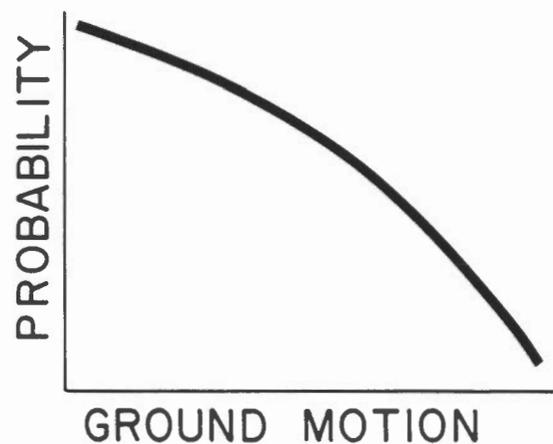


Figure 6. Schematic of probabilistic seismic ground motion methodology showing: (a) earthquake source zones and computational grid; (b) magnitude recurrence relations terminated at upper-bound magnitude ( $M_x$ ); (c) ground motion attenuation; and (d) probability distribution of ground motion parameter at a site or grid point.

For a particular site, or for each grid point on a map, a distribution function for probability of exceedence (Figure 6d) is computed by numerical integration of ground motion parameter contributions from all relevant source zones. For these calculations we have employed an adaptation of the computer program developed by McGuire (1976) (Basham et al., 1982). The results for all grid points can be displayed as contours of the ground motion parameter at a fixed probability or of probability at a fixed level of ground motion.

### 3.3 Earthquake Source Zones in Eastern Canada

For computation of the new risk maps the seismicity of Canada and adjacent active regions has been modelled with a total of 32 earthquake sources zones. The region of eastern Canada is modelled by the 7 source zones shown in Figure 7. Each of the zones in the figure is identified by its three-letter code and its magnitude recurrence coefficients in the order  $\beta$ ,  $N_0$  and  $M_x$  (equation 1). The general rationalization for this selection of source zones is given by Basham et al. (1982) and will not be repeated here. However, we will treat in some additional detail in later sections the zones most relevant to earthquake risk estimation at Gros Cacouna and Melford Point.

### 3.4 Peak Horizontal Acceleration and Velocity in Eastern Canada at a Probability of Exceedence of 10% in 50 years.

The eastern Canada region of the EPB risk maps is shown in Figure 8 and 9 for peak horizontal acceleration and velocity, respectively. These maps reflect the regional seismicity (Figure 2) which is represented in a more generalized way by the earthquake source zone model (Figure 7). Clearly, the most active zones, and in particular those that have experienced the largest

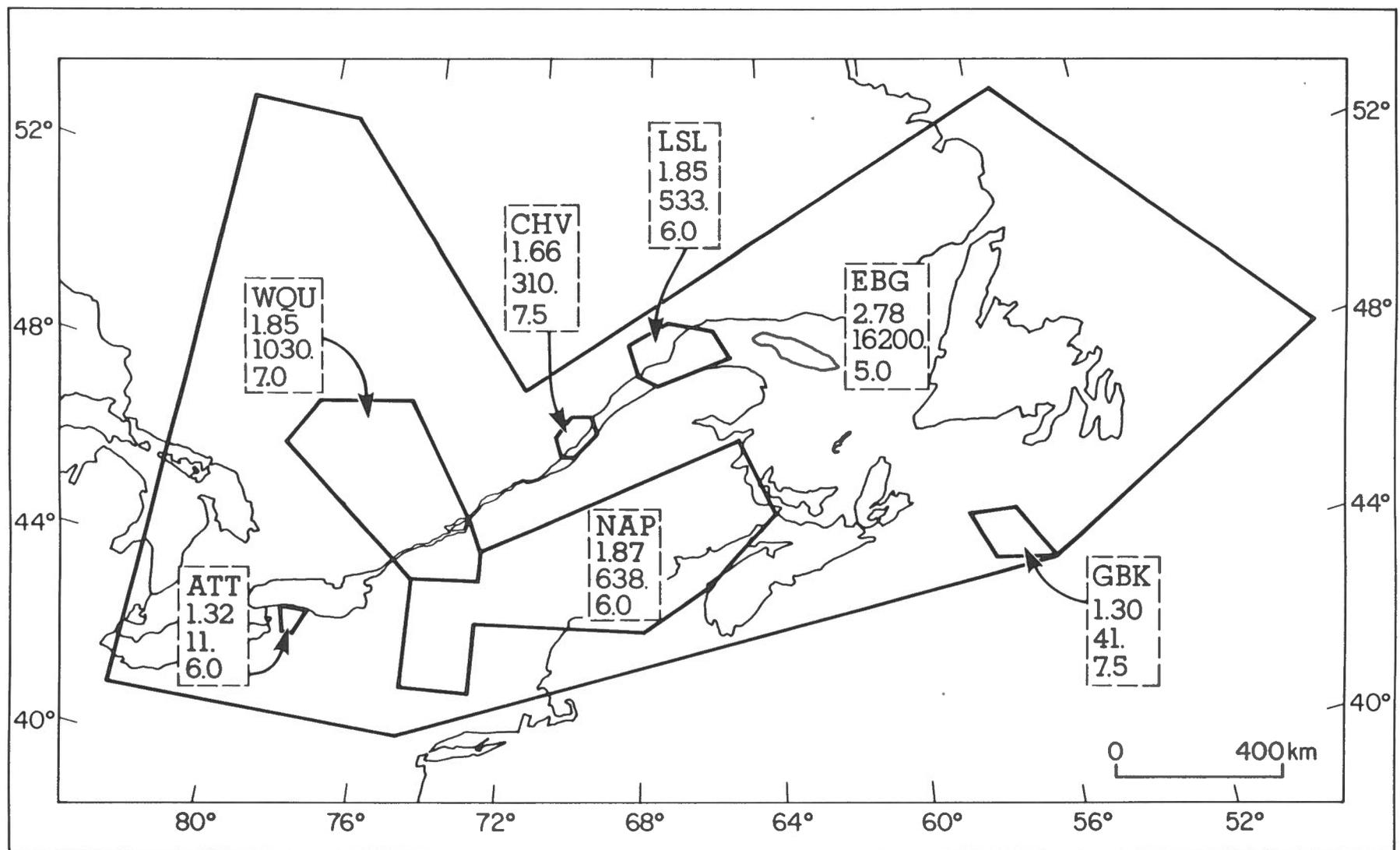
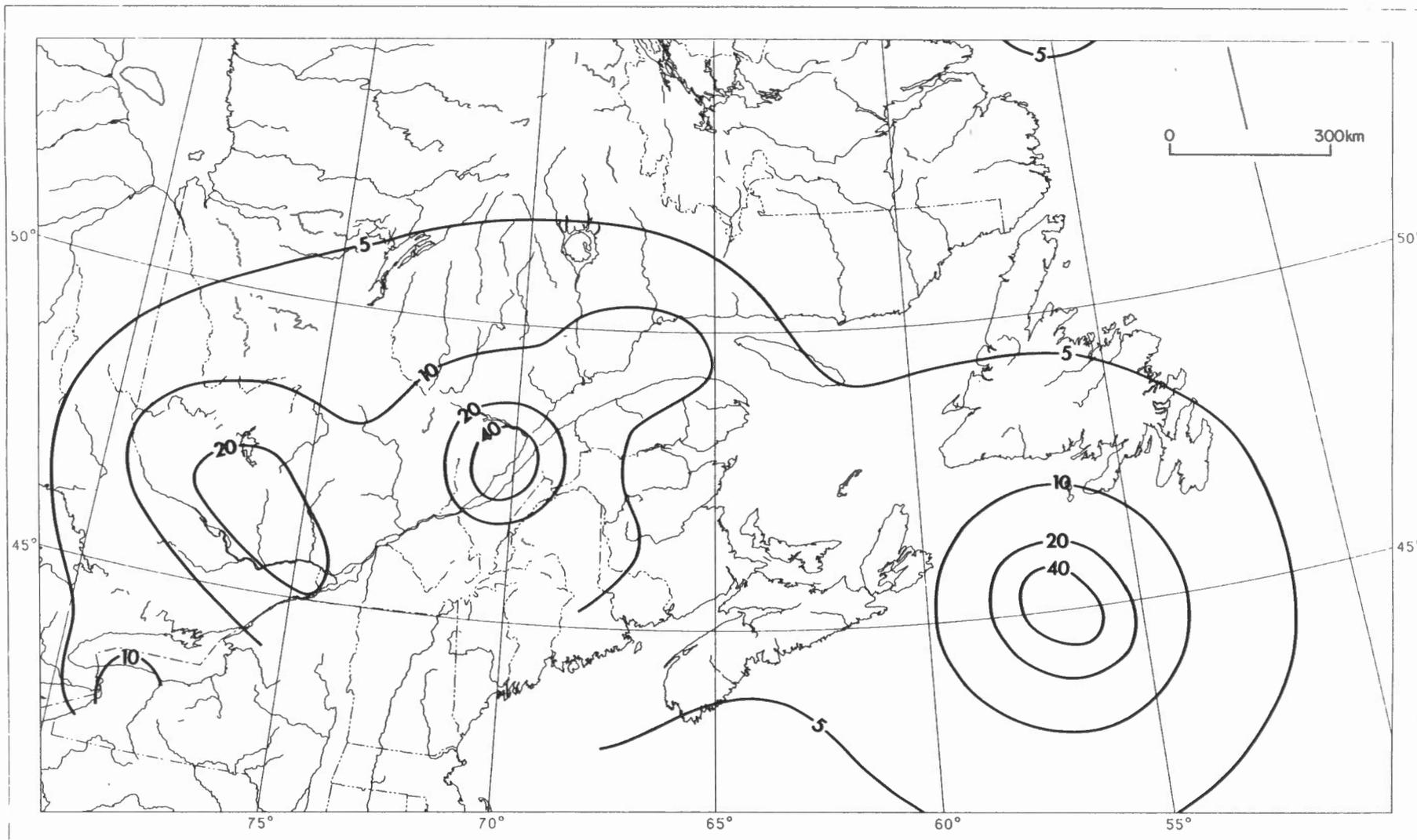


Figure 7. Earthquake source zones in eastern Canada showing, in order, zone code, and the magnitude recurrence coefficients  $\beta$ ,  $N_0$  and  $M_x$  (equation 1) (adapted from Basham et al., 1982). ATT - Attica; CHV - Charlevoix; EBG - Eastern Background; GBK - Grand Banks; LSL - Lower St. Lawrence; NAP - Northern Appalachians; WQU - Western Quebec.



**Figure 8.** Peak horizontal acceleration (%g) in eastern Canada with a probability of exceedence of 10% in 50 years.

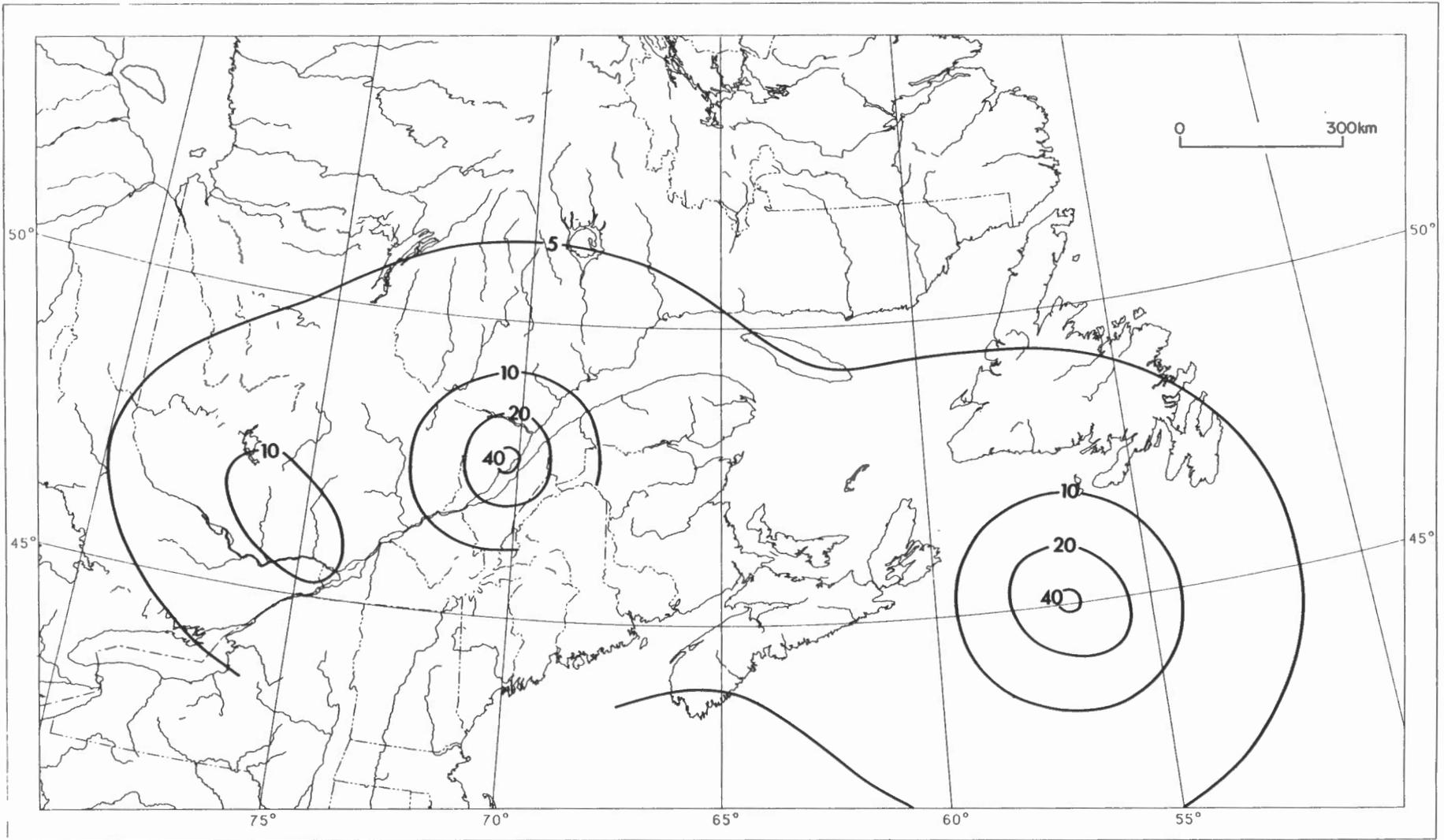


Figure 9. Peak horizontal velocity ( $\text{cm s}^{-1}$ ) in eastern Canada with a probability of exceedence of 10% in 50 years.

historic earthquakes, Charlevoix (CHV) and Grand Banks (GBK), produce small regions of the highest risk. Peak acceleration reaches a maximum level of about 65% g near the centre of the Charlevoix zone and about 61%g near the centre of the Grand Banks zone; peak velocity reaches a level greater than 40 cm s<sup>-1</sup> at these two locations.

These two maps depict probabilistic ground shaking in two dominant frequency ranges, acceleration in the range near 5 Hz and velocity in the range near 1 Hz (see also Hasegawa et al., 1981). They therefore provide information on relative levels of expected shaking respectively for rigid structures and for larger, more flexible structures having lower resonant frequencies. The manner in which these two maps, when converted to zoning maps, will be employed for design provisions for the two general types of structures in a revised edition of the National Building Code has not yet been finalized, although recommendations are being developed (Heidebrecht et al., 1982).

#### 4.0 EARTHQUAKE RISK AT GROS CACOUNA, QUEBEC

##### 4.1 Probabilistic Seismic Ground Motion

Gros Cacouna is located very near to the 40% g contour on Figure 8, and between the 20 and 40 cm s<sup>-1</sup> contours on Figure 9. A site calculation of peak acceleration and velocity, for a location 47.94°N, 69.51°W, is shown in Figure 10 for a range of probabilities. The validity of probabilistic peak ground motion as a useful estimate of earthquake risk, however, needs to be assessed quite carefully for sites near zones of high seismicity.

Although any calculation is dependent on model assumptions (source zone boundaries, magnitude recurrence and attenuation) it becomes increasingly so at low probabilities. The degree of uncertainty in the source zone model, or the "probability" that the model is an incorrect representation of future

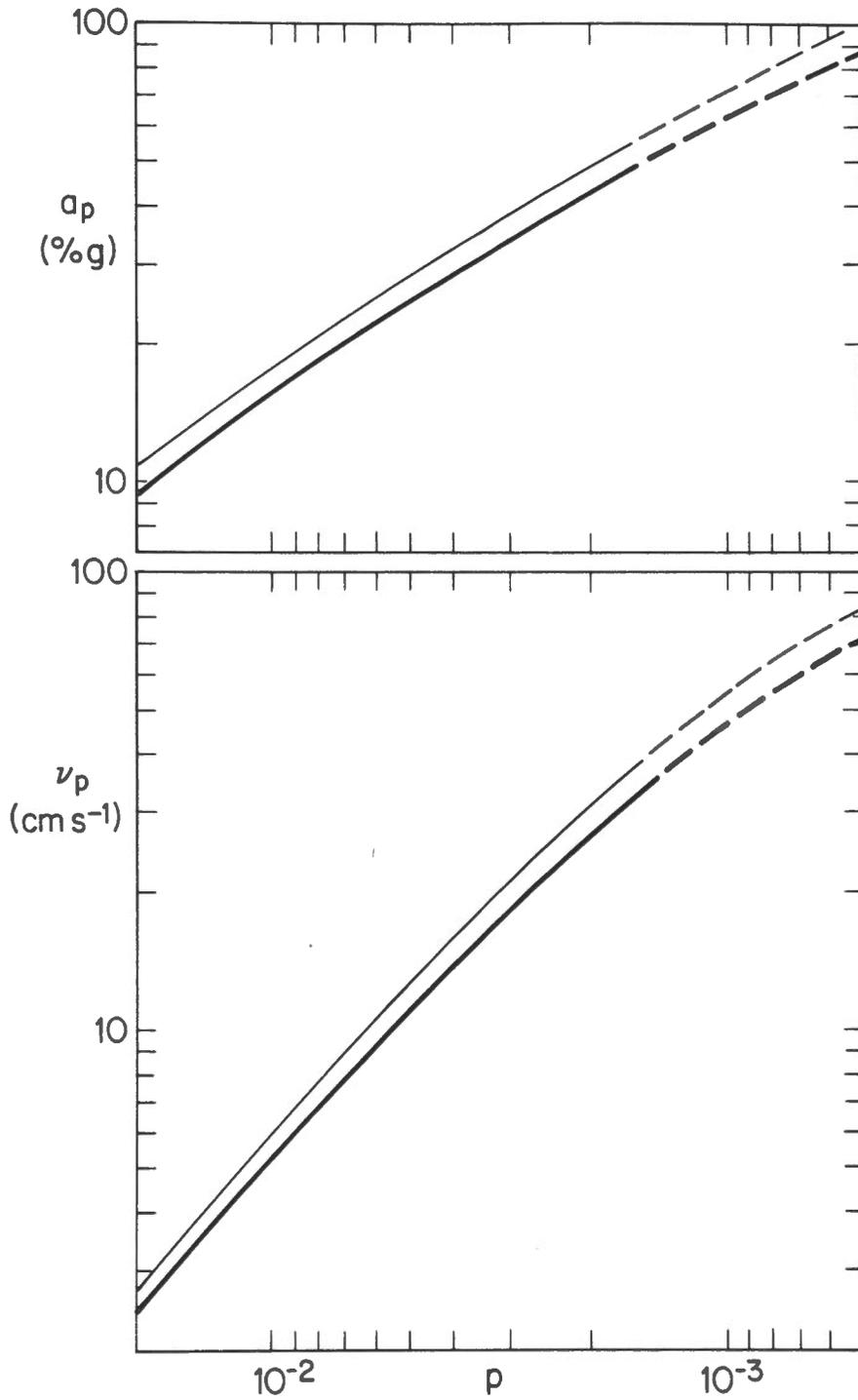


Figure 1C. Peak horizontal acceleration ( $a_p$ , upper) and velocity ( $v_p$ , lower) as a function of probability of exceedence ( $p$ ) for Gros Cacouna (nominal location 47.94°N, 69.51°W) using the regional CHV source zone (Figure 7) (heavy lines) and the confined CHV source zone (Figure 12) (light lines).

earthquakes, although unquantifiable, becomes greater than the probability of the ground motion being calculated. In addition, low probability ground motion is produced by low probability earthquakes and the result becomes particularly sensitive to the choice of upper bound magnitude ( $M_x$ ) and the shape of the recurrence curve as it approaches  $M_x$ . High levels of ground motion, e.g., greater than 60% g and 60 cm s<sup>-1</sup> in Figure 10, can only be produced relatively close to large earthquakes, in the case of Gros Cacouna by large earthquakes in the Charlevoix zone. Hasegawa et al. (1981) have emphasized that equations (2) and (3) are so poorly controlled in the high-magnitude, near-distance range that they should be used with considerable caution in predicting large amplitude ground motion.

In view of the above, this type of probabilistic estimate is not considered adequate to satisfy the seismic design requirement of CSA Standard Z276 (Canadian Standards Association, 1981a) in which a probabilistic "Safe Shutdown Earthquake" would produce "ground motions with a mean recurrence interval of 10,000 years". (It is the opinion of EPB that nowhere in Canada can such an estimate be made in a satisfactorily stable manner.) The alternative allowed by CSA Z276 "in regions where uncertainties are difficult to quantify" is the deterministic approach to estimate the "maximum credible ground motion at the site", which will be discussed in the following section.

There is, however, an application of probabilistic ground motion estimates that is appropriate to certain structures at a regasification terminal. The CSA Standard Z276 specifies an "Operating Base Earthquake" with a "mean recurrence interval of 475 years" when derived probabilistically, or as having one-half the ground motion of the "Safe Shutdown Earthquake" when derived deterministically. In our judgement the probabilistic estimates provided by the EPB risk maps, with a probability of exceedence of 10% in 50

years (equivalent to a recurrence interval of 475 years), are adequate for this purpose. Thus, the "Operating Base Earthquake" design ground motion at Gros Cacouna would have peak acceleration and velocity of about 40% g and 25 cm s<sup>-1</sup>, respectively.

For development of response spectra, the new EPB probabilistic ground motion results enable both the acceleration and velocity ground motion bounds to be set independently by selecting these two parameters at equal risk for a particular site. Figure 11 shows such ground motion bounds for Gros Cacouna at a probability of exceedence of 10% in 50 years. Hasegawa et al. (1981) did not derive peak displacement attenuation relations for Canada because the data base for this parameter was considered too poor. Consequently the displacement levels in Figure 11 are set arbitrarily at the displacement-velocity corner frequency of 0.2 Hz (5 sec) adopted by the National Research Council (1980b). Although peak displacement attenuation relations for the western U.S. are available in the literature (e.g., Trifunac, 1976), a rigorous attempt to define accurate displacement bounds at the low frequencies for the Gros Cacouna site would be made only if certain facilities in a regasification terminal had resonant frequencies below about 0.2 Hz. Typical amplification factors are given in Table K-1 of National Research Council (1980b) and, for nuclear power plant facilities, in Table 1 of Canadian Standards Association (1981b).

#### 4.2 Deterministic Seismic Ground Motion

A deterministic estimate of design seismic ground motion should be both site- and structure-specific: it would consider the influence of local site and foundation conditions on the seismic ground motion propagating from a distance; and it would attempt to estimate ground motion in the frequency

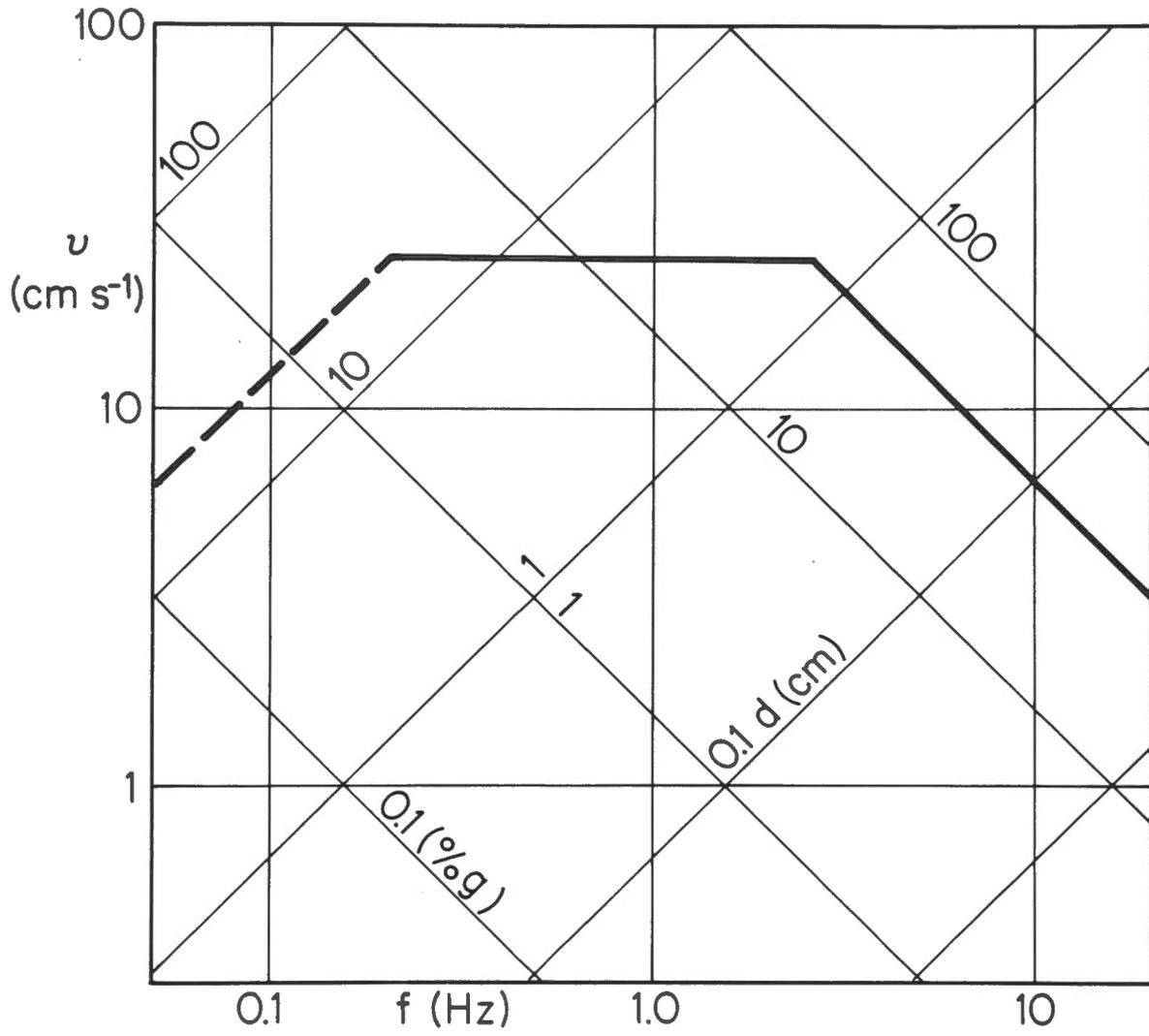


Figure 11. Peak ground motion bounds at a probability of exceedence of 10% in 50 years at Gros Cacouna for development of response spectra.

ranges most relevant to critical structures and facilities in the regasification terminal. Neither the site conditions nor the relevant frequency ranges are known to the present authors. Therefore in the following we can present only some general descriptions of the type of deterministic ground motion that may be appropriate for facilities at Gros Cacouna.

Figure 12 shows a small scale map of the Charlevoix region. The microearthquakes in this zone have been monitored continuously for the past four years using an array of six telemetered seismographs. The epicentral pattern during this period has been very similar to that found during a short field experiment in 1970 and a two-month experiment in 1974 (Leblanc and Buchbinder, 1977; Anglin and Buchbinder, 1981). This indicates that the pattern has been spatially stationary for a period of at least a decade. The only comparison that can be made between the microearthquake and the large historic earthquake patterns is based on the evidence provided by Stevens (1980). The upriver and downriver boundaries of the microearthquake zone are in close proximity to the epicentres of the larger twentieth century earthquakes found by Stevens near the southwestern ends of Ile Aux Coudres and Ile aux Lièvres.

Anglin and Buchbinder's examination of the hypocentral distribution of the microearthquakes indicates that the active zone seems to be bounded on the northwest and southeast by faults in the Precambrian parallel to the river and dipping steeply to the southeast. Hasegawa and Wetmiller (1980) adopted the P nodal plane parallel to the river as the preferred fault orientation for the thrust mechanism of the 19 August 1979 earthquake at a depth of 10 km. This event and its aftershocks are shown in Figure 12 as the small epicentral cluster in the river southwest of Ile aux Lièvres.

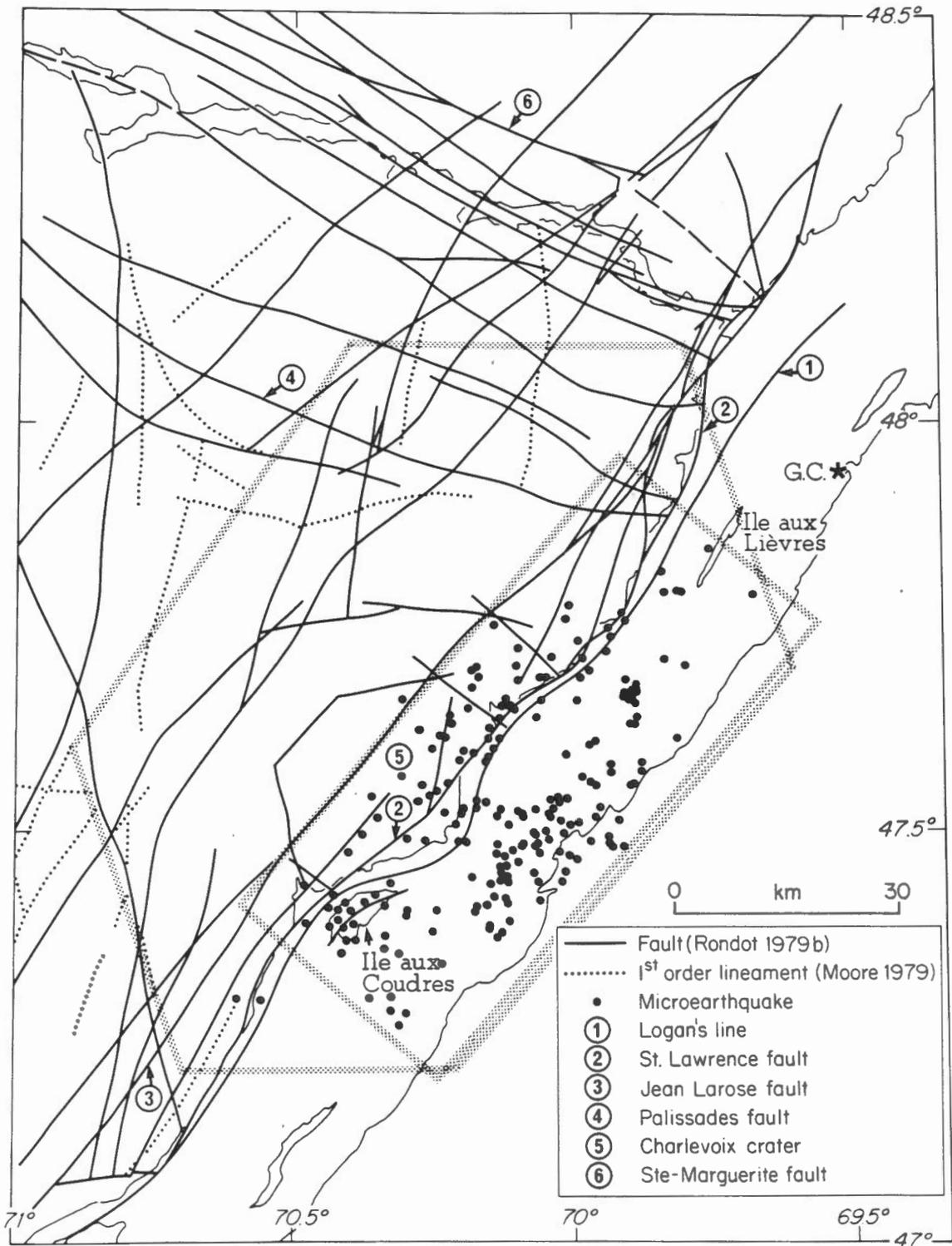


Figure 12. Microearthquakes and structural features in the region of the Charlevoix seismic zone. Large polygon is the Charlevoix source zone in the regional model (Figure 7). The rectangle is the alternative source zone based on the microearthquake distribution.

Most of the structures that can be seen at the surface are within the old Grenville domain (Rondot, 1979b). They are faults running parallel to the St. Lawrence River or parallel to the Saguenay River. The former are probably of Late Precambrian age associated with the St. Lawrence rift (Kumarapeli and Saull, 1966). The latter are associated with the Saguenay graben which was formed during the Appalachian Orogen (Rondot, 1979b). Superimposed on these structural features is the Charlevoix impact crater that was formed in the Late Devonian (Rondot, 1979 a, b).

The microearthquakes are not uniformly distributed throughout the impact crater, nor are they confined to the region of crater structures. However, the coincidence of the crater structures and the older rift structures appears as the best candidate for controlling the earthquake zone on the upriver end near Ile aux Coudres. On the downriver end the microearthquakes tend to diminish near the southern end of Ile aux Lièvres, at the location where the southern most faults that parallel the Saguenay approach the north shore of the river. From all available evidence the Saguenay graben is aseismic (see also Figure 2 which may include some poorly located epicentres). The Saguenay graben structures are not mapped under the river, but the geological reconnaissance of Gros Cacouna commissioned by Fenco Consultants Ltd. (1980a) found nearly vertical joints or faults with similar strike, upstream from the site, which may be an expression of the graben on the south shore. The aseismic trend extends across the river and marks the downriver boundary of the active zone.

The large polygon shown in Figure 12 is the Charlevoix source zone employed in the regional model (Figure 7) and is based primarily on the distribution of historic seismicity (Basham et al., 1982). The rectangle shown in Figure 12 is an alternative, more confined, source model based on the

microearthquake distribution discussed above. For purposes of estimating risk at Gros Gacouna, this is the preferred Charlevoix source model; i.e., it is assumed that large earthquakes have been, and will continue to be confined to the rectangular region.

The effect of employing the more confined Charlevoix zone on the probabilistic ground motion estimates is shown in Figure 10 as the upper set of curves. Because of the location of Gros Cacouna with respect to the two zone models, the two results are very similar.

The "maximum credible" ground motion at Gros Cacouna will be produced by a large earthquake in the Charlevoix zone. The questions to be answered are: how large, and how close?

How large? The upper-bound magnitude used to terminate the magnitude recurrence relation for the Charlevoix zone (Figure 13a) is 7.5. As for all source zones, this was selected as approximately 1/2 magnitude unit greater than the largest historic event. The magnitudes of the large historic earthquakes in the Charlevoix zone warrant some discussion.

The two largest historic earthquakes were likely the events of 1663 and 1925 (Smith, 1962). The effects of the 1663 event are dominated by reports of landslides. Although landslides are a poor indication of the severity of earthquake shaking (because they can occur without earthquake initiation), they are included in the description of Modified Mercalli Intensity X effects, and Smith assigned epicentral intensity X to this earthquake. At the time of preparation of the Canadian Earthquake Epicentre File this epicentral intensity was converted to magnitude 7.7.

The 1925 earthquake was assigned epicentral intensity IX by Smith and instrumental (surface wave) magnitude of 7. In a preliminary review of this earthquake (A.E. Stevens, unpublished data, 1976) no reason was found to doubt

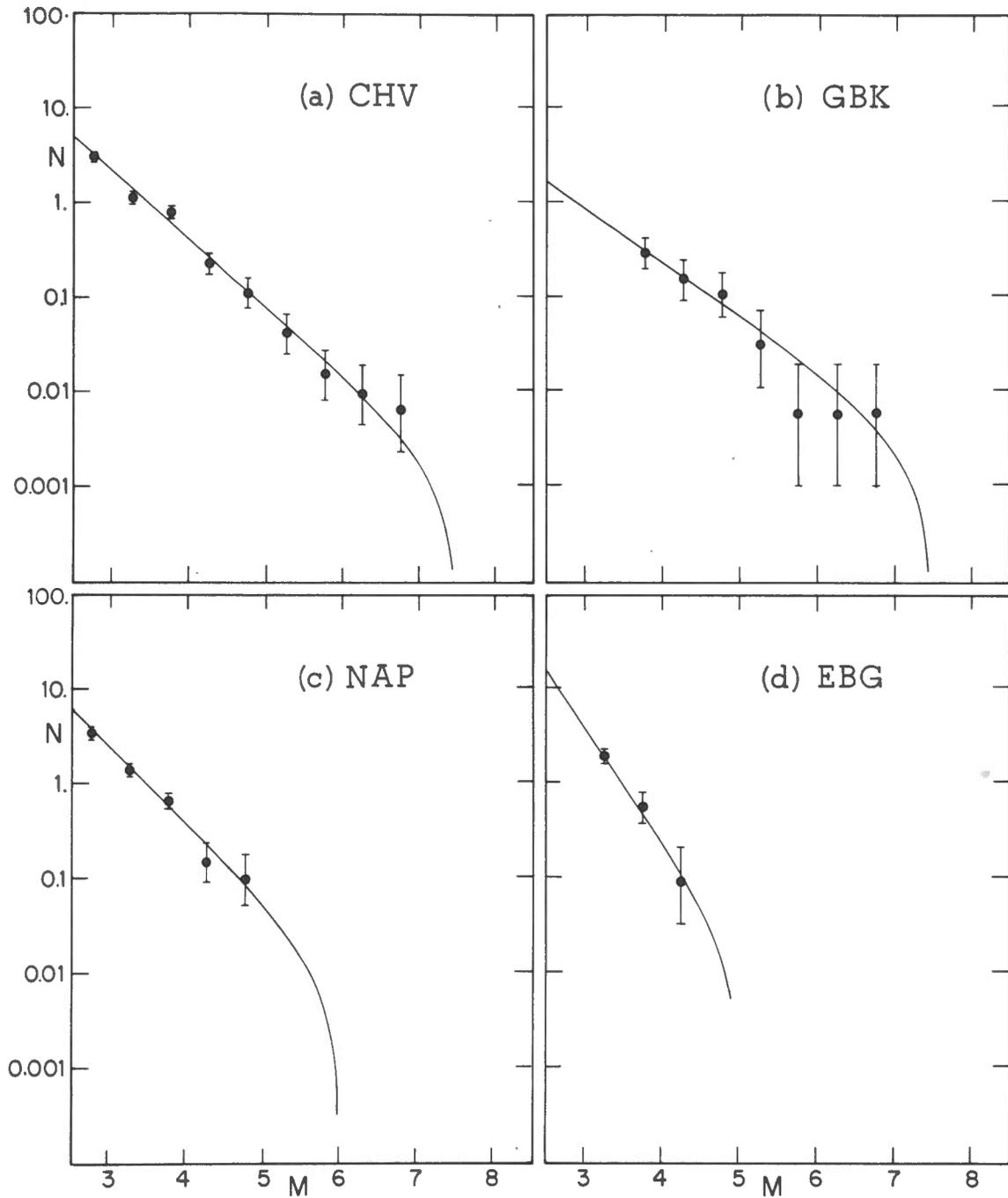


Figure 13. Magnitude recurrence relations for the principal earthquake source zones influencing earthquake risk at Gros Cacouna and Melford Point.  $N$  is the cumulative rate of magnitude  $M$  per annum. Adapted from Basham et al. (1982). See Figure 7 for magnitude recurrence coefficients.

this instrumental magnitude, which is consistent with maximum reported intensity. Subsequently, Street and Turcotte (1977) used available instrumental data to determine an  $m_b$  ( $L_g$ ) magnitude of 6.6. The question of different magnitude scales, and how they may reflect different measures of propagated ground motion in frequency ranges of engineering interest for earthquake risk considerations, is a very difficult one (see also Hasegawa et al., 1981). It is perhaps sufficient to note here that for probabilistic ground motion mapping it is assumed that, below a saturation level of 7.5, each of the magnitude scales employed for Canadian earthquakes is predicting equivalent ground motion at frequencies down to about 1 Hz. The differences between the surface-wave and  $L_g$  magnitudes for the 1925 earthquake are, however, typical of the uncertainties associated with this assumption.

As part of the review of eastern Canadian seismicity by Basham et al. (1979) the reported effects of the 1663 and 1925 earthquakes were compared at greater distances (i.e., ignoring the landslide phenomena) at the few locations where both were reported. Although the resolution of this type of data is poor, the two earthquakes were judged to be quite similar, with a slight tendency for the 1663 earthquake to have produced larger intensities. For purposes of counting Charlevoix earthquakes to establish the magnitude recurrence relation (Figure 13a), both earthquakes are assigned magnitude 7.

The maximum magnitude earthquake for the Charlevoix zone can be postulated on the basis of maximum fault break. If we assume that the extent of the microearthquake zone (Figure 12) indicates the dimensions of pre-existing faults, and that a fault system the length of the zone ruptured in one earthquake, it would have a length of about 80 km. The microearthquakes tend to be quite uniformly distributed at depths between 5

and 20 km (Anglin and Buchbinder, 1981), but such a fault would be expected to break to the surface (perhaps mainly under the river). Thus a reasonable maximum fault depth would be 20 km, yielding a maximum fault area of about 1600 km<sup>2</sup>.

If we adopt for stress drop the single estimate available for the Charlevoix zone, 5 MPa, for the 19 August 1979, magnitude 5 earthquake (Hasegawa and Wetmiller, 1980), the empirical relations of Kanamori and Anderson (1975), using an apparent stress of about 2 MPa (i.e.,  $\approx 1/2$  stress drop), indicate that such an earthquake would have surface wave magnitude of about 7.5.

This is our best estimate of the "maximum credible" earthquake for the Charlevoix zone. The value has (mainly intuitive) support in the fact that larger fault breaks, producing magnitudes approaching 8, seem to occur only in regions of major plate interactions. It should be noted that when  $M_x$  7.5 is used to terminate the cumulative magnitude recurrence relation (Figure 13a) it has a zero rate; i.e., it is an "incredible" event.

How Close? The closest approach of the confined Charlevoix zone to Gros Cacouna is about 17 km (Figure 12). In considering the placement of a large earthquake for purposes of estimating its affects at Gros Cacouna it is important to consider the finite dimensions of the earthquake source. Stevens (1980) has shown that the larger Charlevoix earthquakes of this century have had epicentres, with uncertainties of 15 to 20 km, at either end of the zone. The estimated location at the northeast end is near the southern end of Ile aux Lièvres. For a large earthquake the epicentre is considered the point of first rupture projected onto the surface. Thus, during the 1925 earthquake rupture can be postulated to have initiated near Ile aux Lièvres and

propagated an unknown distance, mainly to the southwest. We emphasize that there is no direct evidence that this was the case or that there is not, for example, a pre-existing fault perpendicular to the river that was the focus of this and other large earthquakes. Nevertheless, this location at the southwestern end of Ile aux Lièvres, at a distance of about 25 km, is a reasonable epicentre for a "design earthquake" affecting Gros Cacouna.

To illustrate further the statement made above that equations (2) and (3) are inappropriate for predicting peak ground motion near to large earthquakes, these relations predict  $144\% g$  and  $192 \text{ cm s}^{-1}$  from a magnitude 7.5 with a focal depth of 15 km at an epicentral distance of 25 km. Peak ground accelerations exceeding  $1 g$  have been recorded only twice: the horizontal Pacoima Dam recordings of the 1971 San Fernando, California earthquake about 3 km from the fault break; and the vertical El Centro Station 6 recording of the 1979 Imperial Valley, California earthquake about 1 km from the fault break. There is no seismological evidence known to the present authors that would suggest ground accelerations exceeding  $1 g$  at a distance of about 25 km from a fault break.

#### 4.3 Development of Design Ground Motion

To develop design seismic ground motion one would, ideally, select experimental accelerogram records typical of the design earthquake (magnitude and distance) conditions outlined above and prepare time histories for the site to be employed in design analysis, and whose response spectra can be used to establish design response spectral levels in the resonant frequency ranges of critical terminal facilities. Unfortunately, there are no strong motion records available for eastern Canada that are typical of the Gros Cacouna design earthquake conditions. Judgement must therefore be applied to attempt

to simulate these conditions using available (mainly western U.S.) strong motion recordings.

The largest western U.S. earthquake for which accelerograms are available is the Kern County earthquake of 1952 with magnitude 7.2 (Kanamori and Jennings, 1978; Bolt, 1978). The horizontal acceleration and (first integral) velocity records at the nearest recording site (43 km) are shown in Figure 14. We will employ these records to illustrate a method of simulating seismic ground motion that may be considered representative of that produced at Gros Cacouna by a Charlevoix design earthquake.

Hasegawa et al. (1981) showed that sustained levels of acceleration and velocity have magnitude and distance scaling coefficients that differ little from those adopted for the peak measures of ground motion, shown for eastern Canada as equations (2) and (3). We will therefore employ these coefficients to scale the entire recordings of Figure 14. In summary, the scaling coefficients are as follows: peak acceleration in the west and east scales as  $e^{1.3M}$ , peak velocity as  $e^{2.3M}$ ; peak acceleration in the west and east scales as  $R^{-1.5}$  and  $R^{-1.1}$ , respectively; peak velocity in the west and east scales as  $R^{-1.3}$  and  $R^{-1.0}$ , respectively. Peak ground motion was defined to be equivalent west and east at a nominal hypocentral distance of 15 km.

The Kern County earthquake had a focal depth of about 15 km, and we can assign a similar focal depth to a Charlevoix design earthquake. Thus, the hypocentral distance for the records in Figure 14 is about 45 km; for the Gros Cacouna situation about 30 km.

The effect of different distances and distance attenuation can be accounted for by scaling the Kern County ground motion back to the nominal distance of 15 km using western attenuation, and then propagating it out to a hypocentral distance of 30 km using eastern attenuation. The records of Figure 14 can therefore be scaled to represent ground motion at Gros Cacouna

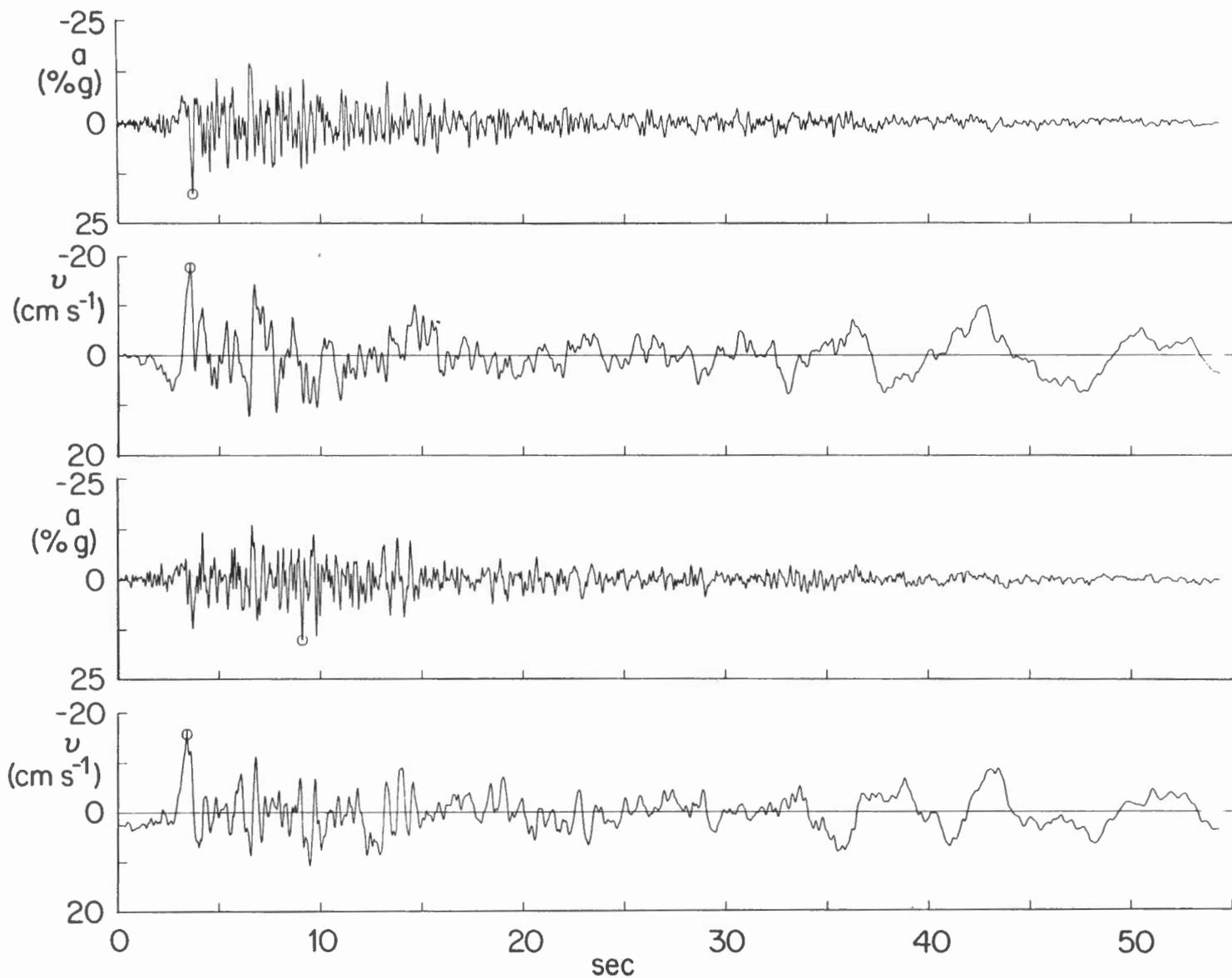


Figure 14. Horizontal acceleration and (first integral) velocity records, S69E component (upper) and N21E component (lower), of the Taft Lincoln School Tunnel strong motion of the 21 July 1952 Kern County, California earthquake. Peak ground motions (circled) are 18% g and 18 cm s<sup>-1</sup> for the S69E component and 15% g and 16 cm s<sup>-1</sup> for the N21E component. Adapted from California Institute of Technology (1971).

resulting from a magnitude 7.2 in the Charlevoix zone by scaling the acceleration time histories by

$$(15/45)^{-1.5} \times (30/15)^{-1.1} = 2.4,$$

and by scaling the velocity time histories by

$$(15/45)^{-1.3} \times (30/15)^{-1.0} = 2.1.$$

The records can be further scaled to larger magnitudes. For example, for magnitude 7.5 the acceleration would be scaled by  $e^{1.3(0.3)} = 1.5$  and the velocity by  $e^{2.3(0.3)} = 2.0$ , resulting in total scaling factors of 3.6 and 4.2 for acceleration and velocity, respectively.

The acceleration and velocity scaling factors of 3.6 and 4.2 indicate that the ground motion at Gros Cacouna from a magnitude 7.5 at Charlevoix would be slightly richer in low frequency energy than is the case for the Kern County records shown in Figure 14. However, there is an additional uncertainty in that we have no method of accounting for different dominant frequencies in the source energy of a magnitude 7.5 earthquake in the Canadian Shield compared to one in the western U.S.

An acceleration time history may be required for design of facilities with high resonant frequencies, a velocity time history for facilities with natural frequencies near 1 Hz. Applying the scale factor of 3.6 to the two similar accelerograms in Figure 14, the design ground motion for Gros Cacouna would be a horizontal acceleration time history with peak acceleration in the range 55 to 65% g. It would have a sustained level (reached by about the five largest cycles, using the definition of Hasegawa et al. (1981)) in the range 35 to 45% g and a duration of 25-35 seconds with peaks exceeding 20% g.

Scaling the velocity records in Figure 14 by a factor of 4.2 would produce a horizontal velocity time history with a peak value in the range 65 to 75  $\text{cm s}^{-1}$ . Representative vertical time histories would be ones scaled to 2/3 of the horizontal motion.

A smaller earthquake, but one that produced a large amount of strong motion data in the near field, was the magnitude 6.6 Imperial Valley, California event of October, 1979 (Porcella and Matthiesen, 1979; Joyner et al., 1981). Although the nature of faulting in this earthquake makes it difficult to extrapolate to the conditions of a large earthquake in the Canadian Shield, we will use the peak acceleration data of Porcella and Matthiesen to illustrate additional restraints that may be put on Gros Cacouna design ground motion.

Figure 15 shows the peak horizontal accelerations plotted against both epicentral distance and distance to the nearest point on the fault. The epicentre was at the southern end of an approximately 40 km long fault and the rupture propagated from south to north. Most of the peak accelerations in, for example, the epicentral distance range near 25 km in Figure 15b were recorded within 1 to 10 km of the fault break. Gros Cacouna is no nearer than about 25 km to the postulated fault break of a magnitude 7.5 earthquake in the Charlevoix zone. Therefore the "distance to the fault" in the Imperial Valley case (Figure 15a) is the better analog of the Gros Cacouna - Charlevoix epicentral (as hypocentral) distance situation.

In the distance range near 25 km in Figure 15a the peak accelerations range from about 5 to 20% g, with an average, or expectation, value of about 10% g. Magnitude scaling from 6.6 to 7.5 requires a scale factor of  $e^{1.3(0.9)} = 3.2$ , and distance attenuation scaling to simulate eastern propagation conditions requires a factor of  $(15/25)^{-0.4} = 1.2$ ; for a total

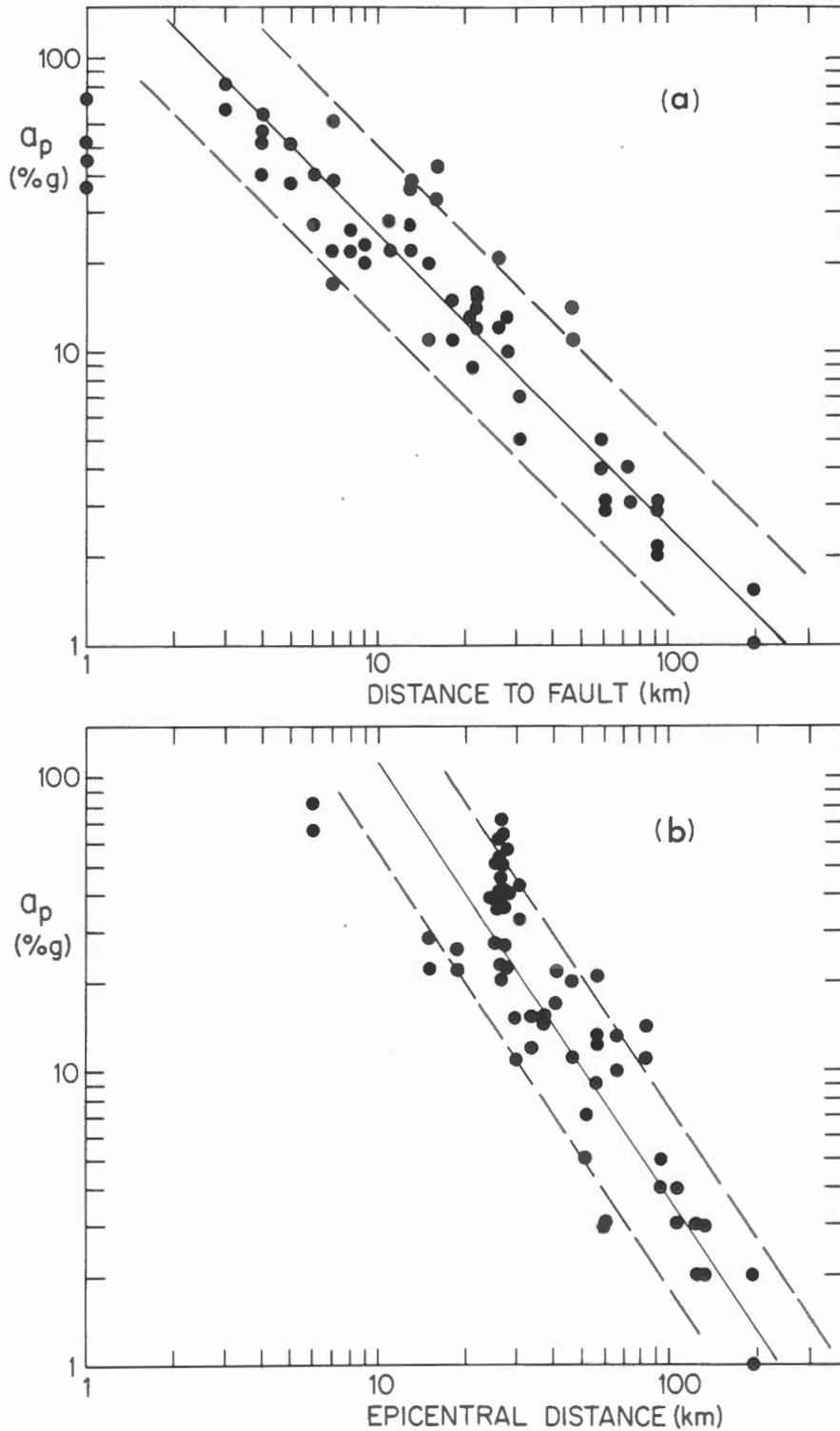


Figure 15. Peak horizontal accelerations from the Imperial Valley, California earthquake of October, 1979 (Porcella and Mattiesen, 1979): plotted in (a) against nearest distance to the fault, and (b) epicentral distance. Straight line trends with slopes of 1.0 and 1.5 are fit to the data in (a) and (b), respectively. The broken lines are a factor of 2 above and below the average trends.

scale factor of 3.8. Scaling the expectation value would produce peak acceleration of about 40% g for the Gros Cacouna-Charlevoix situation; scaling the upper limit of the scattered data would produce an extreme of about 75% g.

Thus, the simulations using the Imperial Valley earthquake produce expected peak accelerations somewhat lower than those developed from the Kern County earthquake. This also indicates, however, that extreme peak accelerations up to 75% g can be developed by taking the worse case at each stage in the extrapolation; i.e., largest possible magnitude, nearest distance to the postulated fault break, and then adopting peak ground motion one standard deviation larger than the expectation value. This is an accumulation of worst cases that we judge goes beyond the credible and accept the Imperial Valley results as reasonable confirmation of the more detailed design ground motion developed from the Kern County data.

## 5. EARTHQUAKE RISK AT MELFORD POINT, NOVA SCOTIA

### 5.1 Probabilistic Seismic Ground motion

Melford Point is in the broad region of relatively low peak ground motion, between 5 and 10% g and 5 and 10 cm s<sup>-1</sup>, in Figures 8 and 9. A site calculation of peak acceleration and velocity is shown in Figure 16 for location 45.5°N, 61.25°W. (These are the approximate coordinates employed by Fenco Consultants Ltd. (1980b). The location is about 10 km southeast of the proposed receiving terminal site shown in the same report, a minor discrepancy that will have no influence on the earthquake risk considerations that follow.)

The arguments in the earlier section concerning the stability of low probability peak ground motion estimates at Gros Cacouna apply equally here. However, Melford Point is not in the near field of large earthquakes so equations (2) and (3) can be considered somewhat better predictors of peak

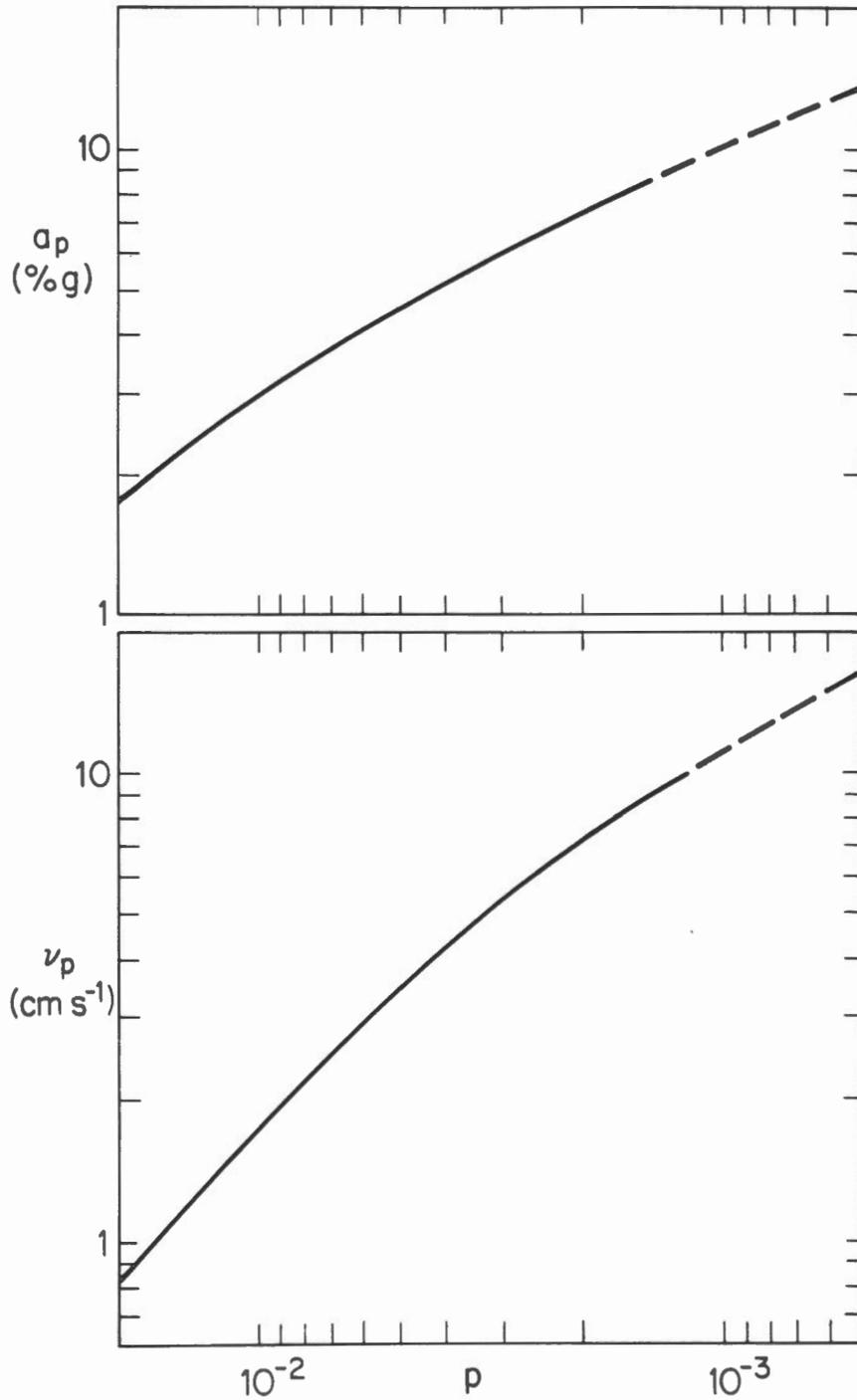


Figure 16. Peak horizontal acceleration ( $a_p$ , upper) and velocity ( $v_p$ , lower) as a function of probability of exceedence ( $p$ ) for Melford Point (nominal location  $45.5^\circ\text{N}$ ,  $61.25^\circ\text{W}$ ).

ground motion from regional earthquakes, and the results are considered to be valid estimates of earthquake risk down to probabilities of about  $10^{-3}$  per annum. Nevertheless, if earthquake loading in this relatively low risk region were to govern some aspects of the terminal design (the possibility of which is unknown to the present authors) it would be important to establish the principal characteristics of the design ground motion. An attempt to do so will be treated in the following section.

The ground motion bounds for 10% exceedence in 50 years shown in Figure 17 would be appropriate for development of "Operating Base Earthquake" response spectra. Similar ground motion bounds with the acceleration level at about 10% g and the velocity level at about  $11 \text{ cm s}^{-1}$  would be appropriate for the lower probability of  $10^{-3}$  per annum.

## 5.2 Deterministic Seismic Ground Motion

A deterministic treatment of Melford Point is concerned principally with assessing the typical earthquakes that produce the risk in order to further characterize the "Safe Shutdown Earthquake" design ground motion that would be required for certain facilities. The first requirement is to know from which earthquake source zones the principal risk contributions are coming.

The risk analysis program employed provides information on the relative risk contributions to a particular site from each of the source zones in the regional model. For the Melford Point site, for peak acceleration in the probability range near  $10^{-3}$  per annum, 87% of the risk comes from the Grand Banks zone, 10% from the Charlevoix zone, 2% from the Eastern Background zone, and the remaining 1% from other zones. (See Figure 7 for source zone geometry relative to Melford Point.) For peak velocity in the probability range near  $10^{-3}$  per annum, 82% comes from the Grand Banks zone and 18% from the

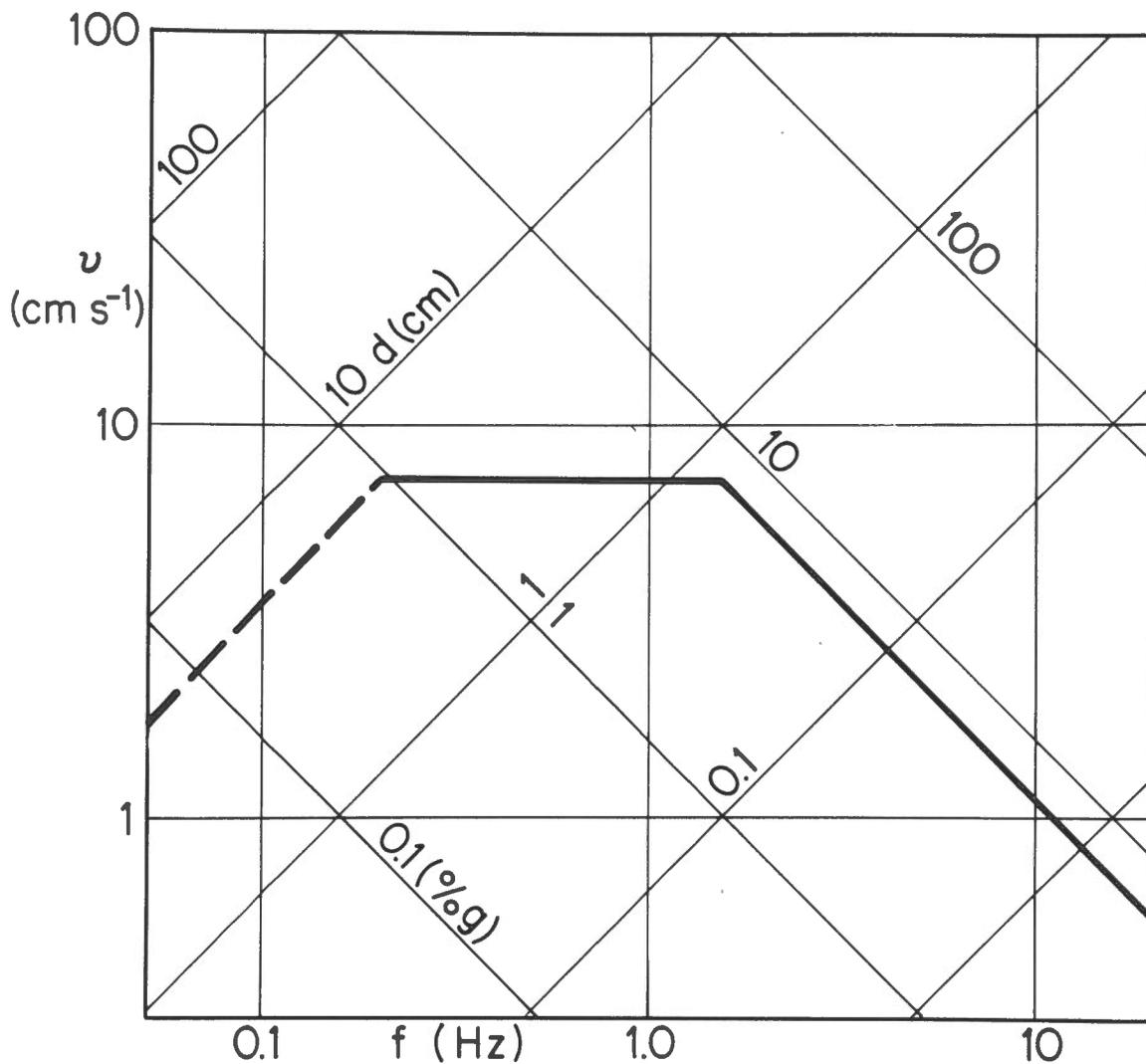


Figure 17. Peak ground motion bounds at a probability of exceedence of 10% in 50 years at Melford Point for development of response spectra.

Charlevoix zone. Clearly, the zones with the larger upper bound magnitudes are dominant (see Figures 7 and 13).

Although much less is known about the Grand Banks zone than about the Charlevoix zone, the two have been assigned the same upper bound magnitude (7.5). A magnitude 7 earthquake occurred in the Grand Banks zone in 1929, but in general the magnitude recurrence relation is poorly defined (Figure 13b). As for the Charlevoix zone discussed in the earlier section, the Grand Banks zone is not expected to experience an earthquake approaching magnitude 8 that is typical of zones of major plate interactions.

The nearest approach of the Grand Banks zone (as defined in Figure 7) to Melford Point is about 270 km. A magnitude 7.5 (selected on the basis of assumed similarities with the Charlevoix zone) at this location would produce peak acceleration of about 13% g and peak velocity of about 20 cm s<sup>-1</sup> at Melford Point. Therefore, the 10<sup>-3</sup> per annum ground motion at Melford Point is similar in acceleration and about a factor of 2 less in velocity than the "maximum credible" that would be produced by the dominant source of risk.

(It can be noted that ground motion amplitude continues to increase with decreasing probability in Figures 11 and 16, even though contributions from near the upper bound magnitude are predominant. This is because of the stochastic term on the ground motion attenuation relations assumed in the risk analysis. At lower probabilities contributions continue to come from the low probability tail of the stochastic distribution, a situation to which must be assigned a large degree of uncertainty.)

The Charlevoix zone, the second largest contributor to the risk at Melford Point, is at a distance of 700 km and will be a source of predominantly low frequency ground motion. Such ground motion is adequately represented by a Grand Banks design earthquake, which would also be a

relatively low frequency source. In fact, because of the large distances involved, probabilistic peak acceleration may be an over-estimate for design ground motion at the higher frequencies of, say, 2 to 10 Hz. Significant contributions at the higher frequencies would come from near earthquakes; for Melford Point from earthquakes that may occur in the Eastern Background zone.

The Eastern Background zone is a broad region of scattered low magnitude seismicity. Its boundaries in Figure 7 are drawn to enclose approximately the regions that have experienced some low level historic and recent seismicity (see also Figure 2). Its contribution to the ground motion displayed in Figures 8 and 9 is negligible. Nevertheless, Melford Point is within this zone and one must at least address the question of a small, but perhaps significant, earthquake near the site.

Assuming, as we do for probabilistic risk estimates, that the earthquakes occur at random within a zone, the magnitude recurrence relation (Figure 13d) can be normalized for different areas surrounding Melford Point. The area of the Eastern Background zone is  $2.7 \times 10^6$  km<sup>2</sup>; the cumulative rate of magnitude 4.5 earthquakes is about 0.04 per annum. On this basis a magnitude 4.5 or greater earthquake has an annual probability of about  $5 \times 10^{-4}$  of occurring within 100 km of Melford Point. It is our judgement that such an event need not be considered as making a significant contribution to the Melford Point design ground motion.

The only other zone that may be relevant, even though it does not contribute to probabilistic risk, is the Northern Appalachians zone whose nearest boundary (see Figure 7) is about 250 km from Melford Point. The eastern boundary of this zone was chosen because the earthquake rates in New Brunswick are significantly greater than further east in Nova Scotia, P.E.I. or the Gulf of St. Lawrence. An upper bound magnitude for the Northern

Appalachians zone of 6.0 (see Figure 13c) was selected because the largest known historic event in the zone was about magnitude 5.5.

A magnitude 6 in the Northern Appalachians zone at its closest approach would produce about 2% g and 0.7 cm s<sup>-1</sup> at Melford Point. Extrapolating the straight line portion of Figure 13c to larger magnitudes, i.e., assuming the upper bound choice was incorrect, would suggest lower rates of large magnitudes than in the Grand Banks zone which is a similar distance of nearest approach. Therefore, the Northern Appalachians zone is not considered to be a significant contributor of design ground motion.

In summary, the horizontal design ground motion for Melford Point can be represented by a relatively low frequency time history with peak acceleration not exceeding about 13% g. Peak ground motion bounds for development of response spectra that may be considered "maximum credible" for this site would have an acceleration-flat level of about 13% g and a velocity-flat level of about 20 cm s<sup>-1</sup>. Vertical design ground motion parameters would be established at 2/3 of these levels.

## 6. CONCLUSIONS

The probabilistic peak acceleration and velocity maps of eastern Canada prepared by the EPB provide a regional framework and a starting point for assessment of earthquake risk at Gros Cacouna and Melford Point. It is argued above, however, that such maps and, in general, the probabilistic method do not provide sufficient information for development of design ground motion for the critical facilities in an LNG regasification terminal. We have therefore called upon available seismological and geological information to illustrate methods of developing the characteristics of design ground motion that comply with the intent of the CSA standard for LNG facilities.

The requirements for earthquake risk assessment at these two sites are quite different because Gros Cacouna is near to the most active earthquake zone in eastern Canada, whereas Melford Point is in a region of very low historic and recent seismicity, but affected by distant earthquake sources. This difference governs treatment of available data, but for both sites a large amount of judgement is required to estimate design ground motion produced by possible large earthquakes when there are no appropriate experimental strong motion data yet recorded in eastern North America.

The design ground motion for critical facilities, which in CSA Standard Z276 when used for engineering design applications is called the "Safe Shutdown Earthquake", has been developed for Gros Cacouna in the form of representative horizontal time histories. This ground motion would have a peak acceleration of about 60% g, a sustained level for about 5 cycles of about 40% g and a duration of about 30 seconds with peaks exceeding 20%g. A separate velocity time history, if required for design, would be one similar to the velocity records shown in Figure 14, but scaled to peak velocity of about 70 cm s<sup>-1</sup>. Response spectra used in design would be those that are representative of the response spectra computed from the adopted time history. For the Melford Point site the ground motion would have a peak acceleration of about 13% g. Duration of significant motion is difficult to judge, but because of the large distance to the dominant source it may be longer than for Gros Cacouna, although of much lower amplitude. If a specific time history was not developed, ground motion bounds for development of response spectra would be set at about 13% g and 20 cm s<sup>-1</sup>. Vertical time histories or ground motion bounds would be established at 2/3 of these levels. Thus, judging by the relative levels of design ground motion, the earthquake risk at Gros Cacouna is about 5 times greater than at Melford Point.

The CSA Standard Z276 also specifies an "Operating Base Earthquake". In our judgement the probabilistic estimates provided by the EPB risk maps, with a probability of exceedence of 10% in 50 years, are adequate for this purpose. Thus, the "Operating Base Earthquake" design ground motion at Gros Cacouna would have peak acceleration and velocity of about 40% g and 25 cm s<sup>-1</sup>, respectively; at Melford Point, 7% g and 7 cm s<sup>-1</sup>, respectively. The ground motion bounds for development of "Operating Base Earthquake" response spectra have been illustrated above in Figures 11 and 17.

These derivations have not taken into account any unusual site conditions that may be encountered at Gros Cacouna or Melford Point and that would require some alteration of design ground motion before it can be applied in design. In addition, this assessment has been made without knowledge of the dominant resonant frequencies of critical LNG terminal facilities; further work on design ground motion may be required, particularly if there are important low frequency resonances. Any application of the results presented herein would need to take these factors into consideration.

#### ACKNOWLEDGEMENT

We are grateful for the assistance of Drs. M.J. Berry and H.S. Hasegawa during preparation of this report.

REFERENCES

- Anglin, F.M., and G. Buchbinder (1981). Microseismicity in the mid-St. Lawrence Valley Charlevoix Zone, Quebec. Bull. Seism. Soc. Am. 71. 1553-1560.
- Basham, P.W., D.H. Weichert and M.J. Berry (1979). Regional Assessment of seismic risk in eastern Canada. Bull. Seism. Soc. Am. 69, 1567-1602.
- Basham, P.W., D.H. Weichert, F.M. Anglin, M.J. Berry, and W.G. Milne (1982). New probabilistic strong seismic ground motion maps of Canada: a compilation of earthquake source zones, methods and results. Earth Physics Branch Open File (in preparation).
- Bolt, B.A. (1978). The local magnitude  $M_L$  of the Kern County earthquake of July 21, 1952. Bull. Seism. Soc. Am., 68, 513-515.
- California Institute of Technology (1971). Strong motion earthquake accelerograms - digitized and plotted data: Vol. II - corrected accelerograms and integrated ground velocity and displacement curves. Earthquake Engineering Research Laboratory, EERL 71-50, Pasadena, California.
- Canadian Standards Association (1981a). Liquefied natural gas (LNG)-production storage and handling. CSA standard Z276-M1981, Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario.
- Canadian Standards Association (1981b). Design procedures for seismic qualification of CANDU nuclear power plants. CSA Standard CAN3-N289.3M, Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario.
- Cornell, C.A. (1968). Engineering seismic risk analysis. Bull. Seism. Soc. Am. 58, 1583-1606.
- Fenco Consultants Ltd. (1980a). LNG receiving terminal, seismic risk and local faults, Gros Cacouna, Quebec. Fenco Consultants Ltd., Toronto.
- Fenco Consultants Ltd. (1980b). LNG receiving terminal, seismic risk and local faults, Melford Point, Nova Scotia. Fenco Consultants Ltd., Toronto.
- Fenco Consultants Ltd. (1981a). LNG receiving terminal, seismic risk-Addendum 1, Melford Point, Nova Scotia. Fenco Consultants Ltd., Toronto.
- Fenco Consultants Ltd. (1981b). LNG receiving terminal, seismic risk-Addendum 2, Gros Cacouna, Quebec. Fenco Consultants Ltd., Toronto.
- Hasegawa, H.S., and J. Adams (1981). Crustal stresses and seismotectonics in eastern Canada. Earth Physics Branch Open File No. 81-12, 42 pp.

- Hasegawa, H.S., and R.J. Wetmiller (1980). The Charlevoix earthquake of 19 August 1979 and its seismo-tectonic environment. Earthquake Notes, 51, 23-37.
- Hasegawa, H.S., P.W. Basham and M.J. Berry (1981). Attenuation relations for strong seismic ground motion in Canada. Bull. Seism. Soc. Am., 71, 1943-1962.
- Heidebrecht, A.C., P.W. Basham, J.H. Rainer and M.J. Berry (1982). Engineering applications of new probabilistic seismic ground motion maps of Canada. (in preparation).
- Joyner, W.B., D.M. Boore and R.L. Porcella (1981). Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake. U.S. Geol. Survey, Open-File Report 81-365, 46 pp.
- Kanamori, H., and D.L. Anderson (1975). Theoretical basis of some empirical relations in seismology. Bull. Seism. Soc. Am., 65, 1073-1095.
- Kanamori, H., and P.C. Jennings (1978). Determination of local magnitude,  $M_L$ , from strong-motion accelerograms. Bull. Seism. Soc. Am., 68, 471-485.
- King, L.H., and B. MacLean (1970). Continuous seismic-reflection study of Orpheus gravity anomaly. Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol., 54, 2007-2031.
- King, L.H., and B. MacLean (1976). Geology of the Scotian Shelf and adjacent areas. GSC Paper 74-31, including GS Map 812H, Geol. Survey of Canada, Energy, Mines and Resources, Ottawa.
- King, L.H., B. MacLean, G.A. Bartlett, J.A. Jeletsky and W.S. Hopkins (1970). Cretaceous strata on the Scotian Shelf. Can. J. Earth Sci., 7, 145-155.
- Kumarapeli, P.S., and V.A. Saull (1966). The St. Lawrence Valley system: A North American equivalent of the East African rift valley system. Can. J. Earth Sci., 3, 639-658.
- Leblanc, G., and G. Buchbinder (1977). Second microearthquake survey of the St. Lawrence Valley near La Malbaie, Quebec. Can. J. Earth Sci., 14, 2778-2789.
- McGuire, R.K. (1976). FORTRAN computer program for seismic risk analysis. U.S. Geological Survey Open File Report 76-67, 90 pp.
- Milne, W.G., and A.G. Davenport (1969). Distribution of earthquake risk in Canada. Bull. Seism. Soc. Am., 59, 729-754.
- Moore, H.D. (1979). Mapping and classification of structural linears in Laurentide Park area of Quebec based on Landsat images. Earth Physics Branch Open File No. 79-19, 16 pp.

- National Research Council (1980a). National Building Code of Canada 1980. Associate Committee on the National Building Code, NRCC No. 17303, National Research Council, Ottawa.
- National Research Council (1980b). The Supplement to the National Building Code of Canada 1980. Associate Committee on the National Building Code, NRCC No. 17724, National Research Council, Ottawa.
- Page, R.A., and P.W. Basham (1982). Earthquakes and their effects at offshore sites. In: The Offshore Environment and Petroleum Development (P.G. Teleki and L.E. Garrison, Eds.), Marcel Dekker Inc., New York (in preparation).
- Porcella, R.L., and R.B. Matthiesen (1979). Preliminary summary of the U.S. Geological Survey strong-motion records from the October 15, 1979 Imperial Valley earthquake. U.S. Geol. Survey, Open-File Report 79-1654, 41 pp.
- Rondot, J. (1979a). Astroblème de Charlevoix, Anorthosite de Saint-Urbain et Stratigraphie. Guide d'excursion A8 et B8. Université Laval, Québec.
- Rondot, J. (1979b). Reconnaissance Géologiques dans Charlevoix-Saguenay. Ministère des Richesses naturelles du Québec, DPV-682, 44 pp.
- Sanford, B.V., A.C. Grant, J.A. Wade and M.S. Barss (1979). Geology of Eastern Canada and adjacent areas. GSC Map 1401A, Geol. Survey of Canada, Energy, Mines and Resources, Ottawa.
- Smith, W.E.T. (1962). Earthquakes of eastern Canada and adjacent areas: 1534-1927. Pub. Dom. Obs., 26, 271-301.
- Stevens, A.E. (1980). Re-examination of some larger La Malbaie, Quebec, earthquakes (1924-1978). Bull. Seism. Soc. Am., 70, 529-557.
- Street, R.L., and F.T. Turcotte (1977). A study of northeastern North American spectral moments, magnitudes and intensities. Bull. Seism. Soc. Am., 67, 599-614.
- Trifunac, M.D. (1976). Preliminary analysis of the peaks of strong earthquake ground motion-dependence of peaks on earthquake magnitude, epicentral distance, and recording site conditions. Bull. Seism. Soc. Am., 66, 189-219.
- Weichert, D.H. (1980). Estimation of the earthquake recurrence parameters for unequal observation periods for different magnitudes. Bull. Seism. Soc. Am., 70, 1337-1346.
- Weichert, D.H., and W.G. Milne (1979). On Canadian methodologies of probabilistic seismic risk estimation. Bull. Seism. Soc. Am., 69, 1549-1566.
- Whitham, K., W.G. Milne and W.E.T. Smith (1970). The new seismic zoning map for Canada 1970. Can. Underwriter, 15, 6.

RISQUE SEISMIQUE A GROS CACOUNA,  
QUEBEC, ET A MELFORD POINT,  
NOUVELLE-ECOSSE

P.W. Basham  
P. Morel-à-l'Huissier  
F.M. Anglin

Direction de la physique du globe  
Energie, Mines et Ressources Canada

Dossier public de la Direction de la physique du globe No. 82-2  
Ottawa, Canada, 1982

iii + 59 pages et 17 figures

Prix: \$33.00

Reproduction interdite

RISQUE SEISMIQUE A GROS CACOUNA, QUEBEC, ET A  
MELFORD POINT, NOUVELLE-ECOSSE

Sommaire pour la Direction

Un des facteurs à prendre en considération lors de la conception et de la construction d'un terminal pour GNL est le risque séismique - risque potentiel car un tremblement de terre important peut endommager les installations du terminal, répandre du GNL et disperser du gaz inflammable avec tout ce que cela implique comme danger pour la population sans compter les pertes économiques. Ce rapport présente une étude du risque séismique à Gros Cacouna, Québec, et, à Melford Point, Nouvelle-Ecosse, les deux emplacements de l'Est canadien à être pris en considération comme sites possibles pour une usine de regazéification du GNL dans le cadre du Projet Pilote de l'Arctique. Les nouvelles cartes de risque séismique pour l'Est du Canada, partie des cartes nationales qui seront utilisées pour développer les nouvelles cartes de zonage du risque séismique de l'édition de 1985 du Code national du bâtiment, fournissent le cadre régional. Des informations séismologiques et géologiques additionnelles sont ensuite employées pour dériver, en fonction des normes de l'ACNOR pour des installations de GNL, le mouvement d'origine séismique du sol à prendre en considération lors de la conception.

Les risques séismiques à Gros Cacouna et à Melford Point sont très différents du fait que Gros Cacouna se situe près de la zone séismique la plus active de l'Est canadien alors que Melford Point se situe dans une région de très faible séismicité historique ou récente affectée seulement par des zones séismiques distantes. Cependant, pour les deux sites, une grande part de jugement est requise dans l'estimation des mouvements du sol pouvant être produits par un fort tremblement de terre quasi-improbable.

(ii)

Pour Gros Cacouna, une étude des mouvements représentatifs du sol pour des installations critiques est développée en extrapolant à l'Est canadien les données sur les mouvements forts de l'Ouest des E.U. afin de produire ce qui est jugé comme l'effet maximum crédible à Gros Cacouna d'un tremblement de terre important se produisant dans la zone de Charlevoix. Ces mouvements du sol peuvent être caractérisés par une accélération horizontale maximale d'environ 60% g dans le domaine des fréquences les plus élevées. Pour Melford Point, il est démontré que les mouvements maximums du sol pouvant être produits par la zone sismique du Grand Banc peuvent être caractérisés par une accélération horizontale maximale d'environ 13% g. En conséquence, en tenant compte des niveaux relatifs des mouvements conceptuels du sol, le risque sismique à Gros Cacouna est environ 5 fois plus grand qu'à Melford Point.

Ces déterminations ont été effectuées sans connaissance de conditions particulières pour chacun des sites, conditions qui peuvent se rencontrer tant à Gros Cacouna qu'à Melford Point et qui dans ce cas nécessiteraient certaines révisions avant de pouvoir utiliser les résultats pour la conception technique. De plus, l'évaluation a été effectuée sans connaissance des fréquences de résonance des installations d'un terminal de GNL; une étude supplémentaire sera peut-être nécessaire, en particulier si une partie des installations répond principalement aux mouvements du sol de basses fréquences.

Risque Séismique à Gros Cacouna, Québec, et à Melford  
Point, Nouvelle-Ecosse

Table des matières

	Page
Sommaire pour la Direction .....	i
1. INTRODUCTION .....	1
2. SEISMICITE DANS L'EST CANADIEN .....	3
2.1 Séismes canadiens importants .....	3
2.2 Séismes de l'Est canadien entre 1661 et 1979 .....	6
2.3 Séismicité et géologie de la région de Gros Cacouna, Québec .....	8
2.4 Séismicité et géologie de la région de Melford Point, Nouvelle-Ecosse .....	11
3. ETUDE PROBABILISTE DES FORTS MOUVEMENTS SEISMIQUES DU SOL DANS L'EST CANADIEN .....	15
3.1 Carte de zonage du risque séismique de 1970 .....	15
3.2 Méthodologie actuelle du risque séismique .....	17
3.3 Zones séismiques de l'Est du Canada .....	20
3.4 Accélération et vitesse horizontales maximales dans l'Est canadien à une probabilité de dépassement de 10% en 50 ans .....	22
4. RISQUE SEISMIQUE A GROS CACOUNA, QUEBEC .....	25
4.1 Etude probabiliste des mouvements séismiques du sol .....	25
4.2 Etude déterministe des mouvements séismiques du sol .....	30
4.3 Elaboration d'une méthode d'analyse des mouvements du sol .....	39
5. RISQUE SEISMIQUE A MELFORD POINT, NOUVELLE-ECOSSE .....	46
5.1 Etude probabiliste des mouvements séismiques du sol .....	46
5.2 Etude déterministe des mouvements séismiques du sol .....	48
6. CONCLUSION .....	53
REMERCIEMENTS .....	56
BIBLIOGRAPHIE .....	57



## 1. INTRODUCTION

Le Projet Pilote de l'Arctique est une proposition d'acheminement par pipeline du gaz naturel des gisements situés au Nord-Est de l'île Melville vers un terminal de liquéfaction à Bridport Inlet. Là, le gaz naturel liquéfié (GNL) sera transvasé dans des brise-glace transporteurs de GNL et sera acheminé vers un terminal de regazéification situé dans l'Est du Canada. Ce terminal devrait se situer soit à Gros Cacouna au Québec soit à Melford Point en Nouvelle-Ecosse.

Un des facteurs à prendre en considération pour la conception et la construction d'un terminal de regazéification est le risque séismique-risque potentiel car un tremblement de terre important peut endommager les installations du terminal, répandre du GNL et disperser du gaz inflammable avec tout ce que cela implique comme danger pour la population sans compter les pertes économiques.

Des évaluations du risque séismique pour les emplacements de Gros Cacouna et de Melford Point ont été effectuées par Fenco Consultants Ltd. (1980a,b; 1981a,b) pour le compte de Transcanada Pipelines, propriétaire et opérateur du terminal en question. Comme contribution à la considération par Energie, Mines et Ressources de ces deux emplacements comme sites envisagés pour le terminal, la Direction de la physique du globe (DPG) s'est vue demander d'entreprendre une étude indépendante des risques séismiques. Ce rapport a donc pour but de présenter les résultats de cette étude.

Les exigences en matière de conception de bâtiments anti-séismiques au Canada sont stipulées dans le Code national du bâtiment (Conseil national de recherches, 1980a,b) et se réfèrent à la carte de zonage du risque séismique du Canada publiée en 1970. Cette carte de zonage de 1970 qui montre

l'accélération horizontale maximale du sol à la probabilité de dépassement de 0.01 par année fut développée par la DPG vers la fin des années 60 (Milne et Davenport, 1968; Whitham et coll., 1970). Au cours de la dernière décennie des nouvelles données sur les tremblements de terre ainsi que de nouvelles méthodes d'estimation du risque séismique ont fait que la DPG est maintenant engagée dans un projet de recherche ayant pour but de produire de nouvelles cartes du risque séismique montrant à la fois l'accélération et la vitesse horizontales maximales du sol (Basham et coll., 1982). Dans les plans de révision du Code national du bâtiment, il est envisagé que cette nouvelle information conduira aux nouvelles cartes de zonage devant être publiées dans l'édition de 1985.

Les nouvelles cartes de risque de la DPG utilisent des paramètres simples des mouvements séismiques du sol adaptés à l'évaluation des niveaux relatifs du risque séismique à travers le Canada et ce pour un nombre de zones étendues. Comme telles, elles sont supposées avoir une validité identique à tout emplacement au pays. Elles fournissent donc un cadre régional et un point de départ pour l'évaluation du risque pour des structures ou des installations spéciales. Elles seront donc utilisées dans ce rapport comme point de départ pour l'évaluation des risques séismiques à Gros Cacouna et à Melford Point.

Les infrastructures nécessaires pour du GNL ne sont pas incluses dans les dispositions régulières du Code national du bâtiment. Celles-ci, ainsi que d'autres installations critiques qui peuvent avoir des conséquences plus néfastes qu'un bâtiment ordinaire si elles s'effondraient suite à un tremblement de terre, requièrent une évaluation plus rigoureuse du risque séismique, et généralement, la réglementation impose des exigences plus sévère

pour leur conception. Une protection adéquate contre les dommages causés par un séisme est généralement obtenue en exigeant que les installations résistent aux secousses d'un tremblement de terre ayant une très faible probabilité de se produire. Le choix d'une probabilité appropriée est une décision socio-économique, c'est-à-dire un compromis entre la sécurité absolue et la pénalisation économique résultant de la conception et de la construction d'installations qui résisteraient aux effets de séismes extrêmes et grandement improbables.

La DPG ne peut entrer dans ce débat socio-économique entre le proposeur et le régulateur. Tout au plus cette étude est destinée à fournir aux agences intéressées une information séismologique appropriée agrémentée de résultats de recherche.

Dans ce qui suit, nous faisons une brève revue de la séismicité de l'Est du Canada ainsi que des méthodes utilisées dans l'élaboration des nouvelles cartes du risque séismique pour l'Est canadien. Notre attention se tourne ensuite vers une évaluation plus rigoureuse des mouvements du sol associés à une forte secousse séismique telle que Gros Cacouna et Melford Point pourraient expérimenter.

## 2. SEISMICITE DANS L'EST CANADIEN

### 2.1 Séismes canadiens importants

Pour replacer les régions et sites considérés dans leur contexte en regard de la séismicité canadienne, la distribution des séismes historiques importants du Canada et des régions avoisinantes est montrée dans la figure 1. Il apparaît très clairement que la côte Ouest du Canada a expérimenté le plus grand nombre de séismes de forte magnitude; le plus

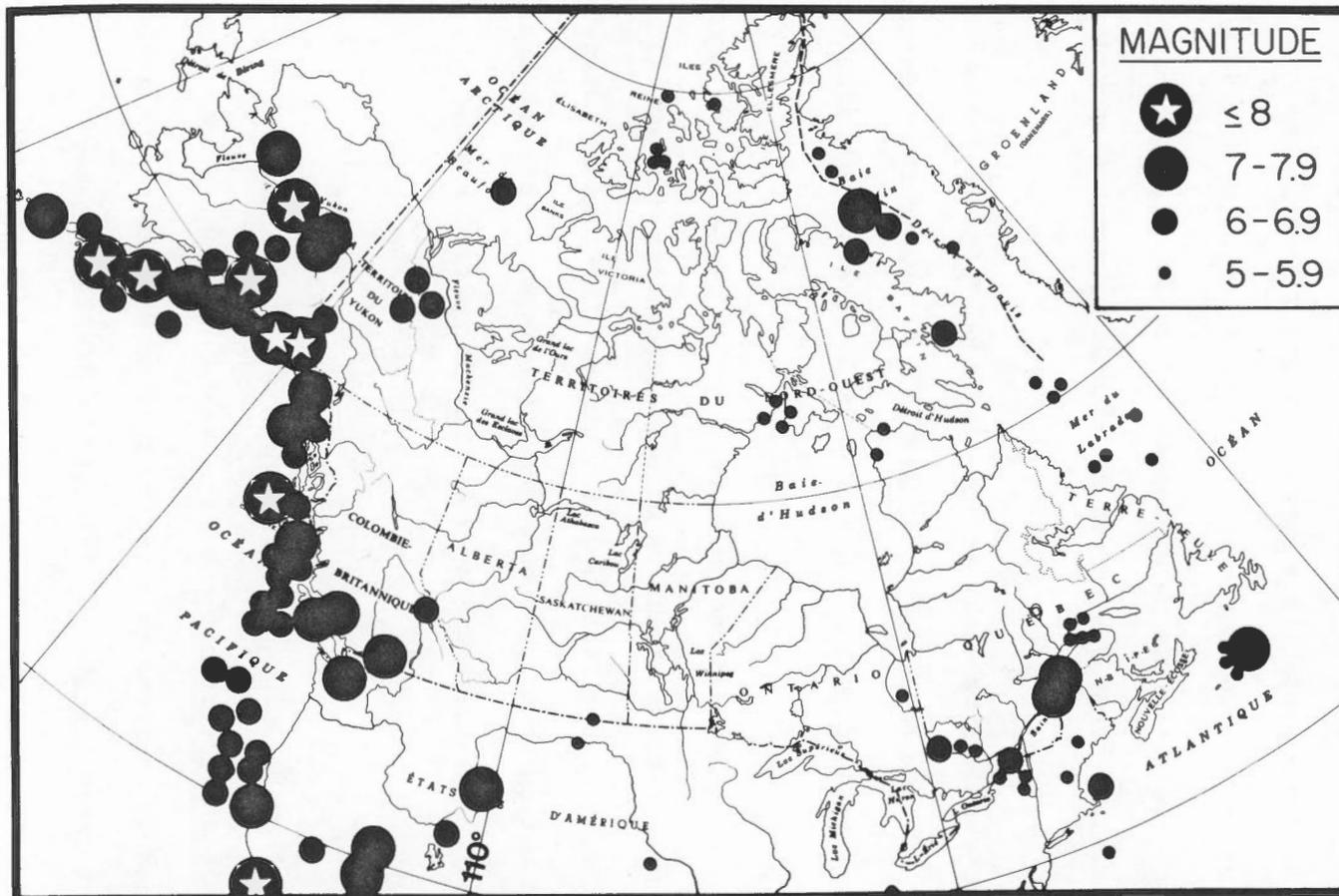


Figure 1. Représentation schématique des tremblements de terre significatifs au Canada et dans les régions avoisinantes. Les symboles utilisés pour les séismes de grande magnitude masquent de nombreux événements de plus faible magnitude. Les séismes de l'intervalle de magnitude 5-5.9 ne sont représentés qu'à l'Est de la longitude 110°0.

important, de magnitude 8.1, s'est produit en 1949 à l'Ouest des îles de la Reine Charlotte.

Les tremblements de terre au large de l'Ouest canadien reflètent la déformation cassante résultant des mouvements relatifs des deux grandes plaques lithosphériques du Pacifique et de l'Amérique du Nord. Les failles décrochantes à composante dextre sont les failles dominantes que l'on retrouve le long des côtes de Californie (faille de San Andréas) ainsi qu'au nord de la Colombie Britannique (zone faillée de la Reine Charlotte). Entre le nord de la Californie et le nord de l'île de Vancouver, les plaques du Pacifique et de l'Amérique du Nord sont séparées par une série de petites plaques océaniques qui sont en passe d'être subductées sous le continent Nord-Américain. Cette tectonique complexe a engendré des tremblements de terre de magnitude allant jusqu'à 7 dans les régions de l'île de Vancouver et du Puget Sound.

Les tremblements de terre de l'Est du Canada se produisent eux dans un environnement intra-plaque qui est beaucoup moins connu du point de vue tectonique. Les séismes du bouclier Précambrien et des régions appalachiennes semblent se produire dans des anciennes zones de faiblesse de la croûte en réponse au champ de contrainte contemporain. Cependant, les zones de faiblesse ainsi que les origines du champ de contrainte ne sont ni bien comprises, ni bien définies (Hasegawa et Adams, 1981).

Sur la marge continentale de l'Est et du Nord, on pense que la plupart des tremblements de terre se produisent dans la lithosphère continentale fissurée au moment de la séparation des masses continentales lors de l'initiation de l'océan Atlantique. Cependant, le nombre de tremblements de terre localisés avec précision pendant l'ère de la

séismologie instrumentale est trop petit pour esquisser autre chose qu'un schéma, et d'autre part, les structures géologiques de la marge sont trop peu connues et trop peu cartographiées pour pouvoir être associées avec les séismes historiques les plus significatifs (Page et Basham, 1982).

## 2.2 Séismes de l'Est canadien entre 1661 et 1979

La figure 2 montre la séismicité de l'Est du Canada et de la région avoisinante du Nord-Est des Etats-Unis. Cette figure fut établie à l'aide d'une sélection de tremblements de terre répertoriés dans le fichier des épicentres de tremblements de terre canadiens qui est un fichier permanent sur bande magnétique mis à jour par la DPG.

Les épicentres de tous les tremblements de terre du fichier possédant une magnitude supérieure à 5.0 sont montrés sur la figure. L'événement le plus ancien de cette catégorie est situé près de Boston et s'est produit en 1568. L'événement le plus ancien s'étant produit en sol canadien est situé près de Montréal et a eu lieu en 1661. Les séismes de magnitude inférieure à 5 sont restreints à ceux enregistrés au cours des trois dernières décennies. Ceci élimine les épicentres d'anciens événements déterminés à partir de données provenant d'une région restreinte et dont la localisation est incertaine. Ceci donne aussi une meilleure image des capacités du réseau séismographique au cours de son développement jusqu'à la présente configuration.

La répartition de la séismicité au cours des premières années montre des concentrations d'événements dans les régions qui furent les premières peuplées, par exemple près de Boston et de Montréal. Les déterminations d'épicentre basées sur les isoséistes ainsi que sur les premières

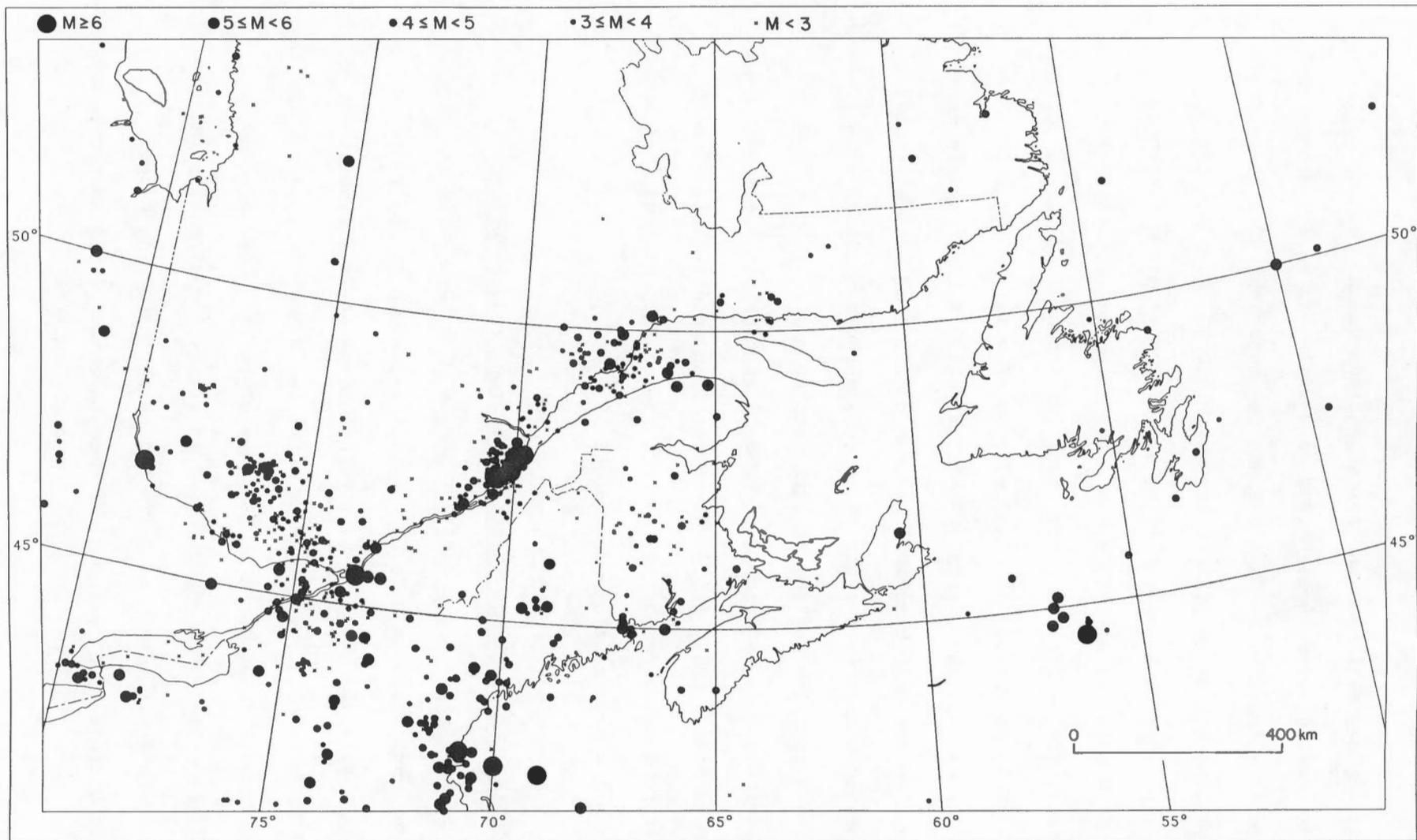


Figure 2. Séismicité dans l'Est canadien. Les séismes possédant des magnitudes comprises entre 4-5, 3-4, et inférieures à 3 ne sont représentés respectivement que depuis 1950, 1960 et 1970.

observations séismographiques sont moins précises que ne le sont celles obtenues lors des deux dernières décennies à l'aide du réseau moderne de seismographes. Néanmoins, la figure 2 est une représentation utile de la distribution générale de la séismicité historique et récente. Une évaluation plus détaillée de la plénitude des données des différentes catégories de magnitude, plénitude qui varie selon les régions de la carte de la figure 2, est requise pour modéliser les zones séismiques à utiliser pour l'estimation du risque séismique (Basham et coll., 1979; avec d'autres modifications par Basham et coll., 1982). Il faut savoir par exemple que l'actuel réseau séismographique de l'Est du Canada ne peut localiser beaucoup de tremblements de terre ayant des magnitudes inférieures à 4 pour les régions au large des côtes.

La distribution de la séismicité dans l'Est canadien a été récemment décrite par Basham et coll. (1979) et ne sera pas répétée ici. Cependant, les zones séismiques se rapportant au sujet de ce rapport sont brièvement décrites dans les deux sections suivantes.

### 2.3 Séismicité et géologie de la région de Gros Cacouna, Québec

Gros Cacouna (figure 3) est située sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent environ 10 km en aval de Rivière-du-Loup et 150 km au Nord-Est de la ville de Québec. La zone séismique de la région qui est aussi historiquement la plus active de l'Est du Canada est située entre la ville de Québec et l'embouchure du Saguenay et porte le nom de zone de Charlevoix. Les épacentres reportés sur la figure 3 montrent la grande concentration de tremblements de terre qui se sont produits à des distances de l'ordre de 25 à 100 km de Gros Cacouna. Cette zone qui va

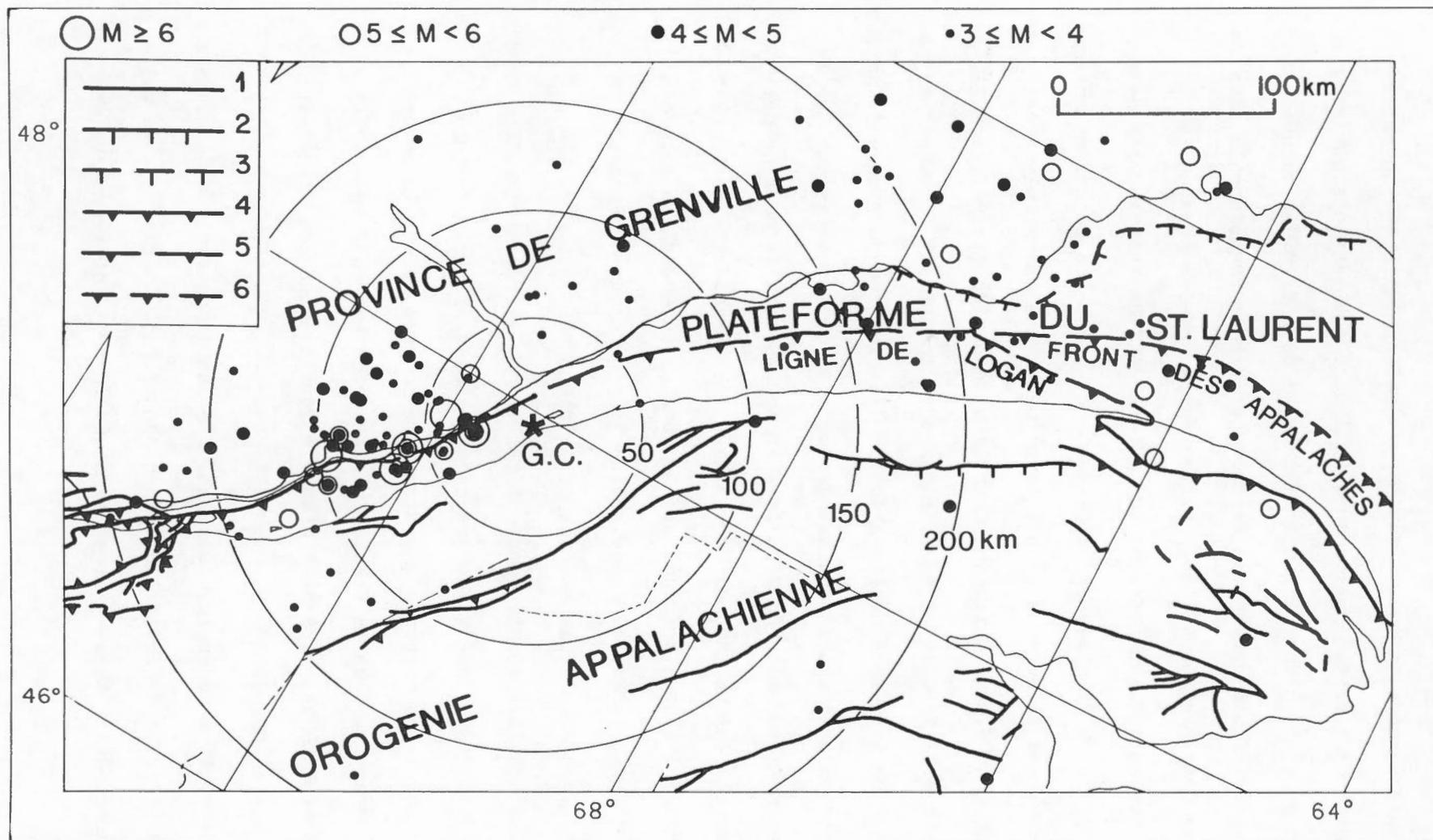


Figure 3. Séismicité et géologie de la région de Gros Cacouna, Québec (G.C.). Les épicentres des tremblements de terre sont représentés par des points ou des cercles conformément à l'échelle de magnitude (M) donnée dans la partie supérieure de la figure. 1 - faille; 2 - faille normale; 3 - faille normale supposée; 4 - faille chevauchante; 5 - faille chevauchante approximative; 6 - faille chevauchante supposée (Sanford et coll., 1979).

avoir la plus grande influence dans l'estimation du risque sismique à Gros Cacouna sera discutée plus en détail dans des sections ultérieures.

Plus en aval, à une distance de l'ordre de 150 km, se trouve un groupe plus diffus d'épicentres centré approximativement sur la rive Nord entre Baie Comeau et Sept-Iles. Cette région appelée zone du Bas Saint-Laurent n'a historiquement pas expérimenté de tremblements de terre de magnitude 6 ou supérieure. Cependant, au cours des dernières années, la fréquence des séismes de faible magnitude a été comparable à celle de la zone de Charlevoix. Ailleurs dans l'Est canadien (voir figure 2), les groupements de sismicité sont suffisamment distants de Gros Cacouna pour n'avoir qu'une influence négligeable sur l'évaluation du risque sismique.

Les trois principaux domaines géologiques qui apparaissent sur la figure 3 sont le domaine du Grenville au Nord-Ouest, le domaine des Appalaches (Taconique) au Sud-Est et la plate-forme du Saint-Laurent coincée entre les deux précédents. Le domaine du Grenville est formé principalement de granites et de gneiss très déformés du Précambrien supérieur alors que la plate-forme du Saint-Laurent est composée de sédiments d'âge Paléozoïque reposant sur le socle Précambrien. Le domaine des Appalaches est formé d'une séquence de sédiments paléozoïques plissés comportant quelques nappes. Une structure majeure de la région est la ligne de Logan qui dans le fleuve Saint-Laurent est confondue avec le front des Appalaches, mais s'en dissocie vers le Nord pour pénétrer dans la péninsule de Gaspé.

D'une manière générale, la sismicité semble concentrée au contact entre les domaines du Grenville et des Appalaches (la plate-forme du Saint-Laurent étant très réduite) avec une majorité d'événements se

produisant dans le Précambrien, mais aucune structure majeure n'a été cartographiée dans le Grenville au Nord-Est du Saguenay (La zone de Charlevoix au Sud-Ouest du Saguenay est traitée en détail dans une section ultérieure). D'un autre côté, certaines des principales structures cartographiées dans les Appalaches semblent avoir une relation spatiale ténue avec des épacentres dispersés.

La figure 3 ne montre aucune structure majeure à Gros Cacouna. La firme Fenco Consultants Ltd. (1980a) chargée du rapport géologique préliminaire du site de Gros Cacouna ne fait mention d'aucune faille à l'intérieur des limites du site proposé. Bien que cette information ne soit pas définitive, à la connaissance des auteurs du présent rapport, il n'existe aucune preuve que des tremblements de terre importants se soient produits dans la proximité immédiate de Gros Cacouna, c'est-à-dire des tremblements de terre qui n'apparaîtraient pas dans notre compréhension actuelle des schémas de sismicité régionale historique ou récente.

#### 2.4 Sismicité et géologie de la région de Melford Point, Nouvelle-Ecosse

Melford Point (figure 4) est situé sur la rive Sud du détroit de Canso, à environ 10 km de Port Hawkesbury. Parmi les séismes reportés sur la figure 4, le plus proche de Melford Point se situe au Nord-Est du Cap-Breton et son épacentre a les coordonnées suivantes: 46.5°N, 60.5°O. Cet événement s'est produit le 19 décembre 1909 et sa localisation est incertaine par au moins 50 km. Il fut ressenti à travers tout le Cap-Breton et Smith (1962) lui a assigné une intensité épacentrale de VI. Quand le fichier des épacentres des tremblements de terre canadiens fut préparé au début des années 70, tous les tremblements de terre se sont vus

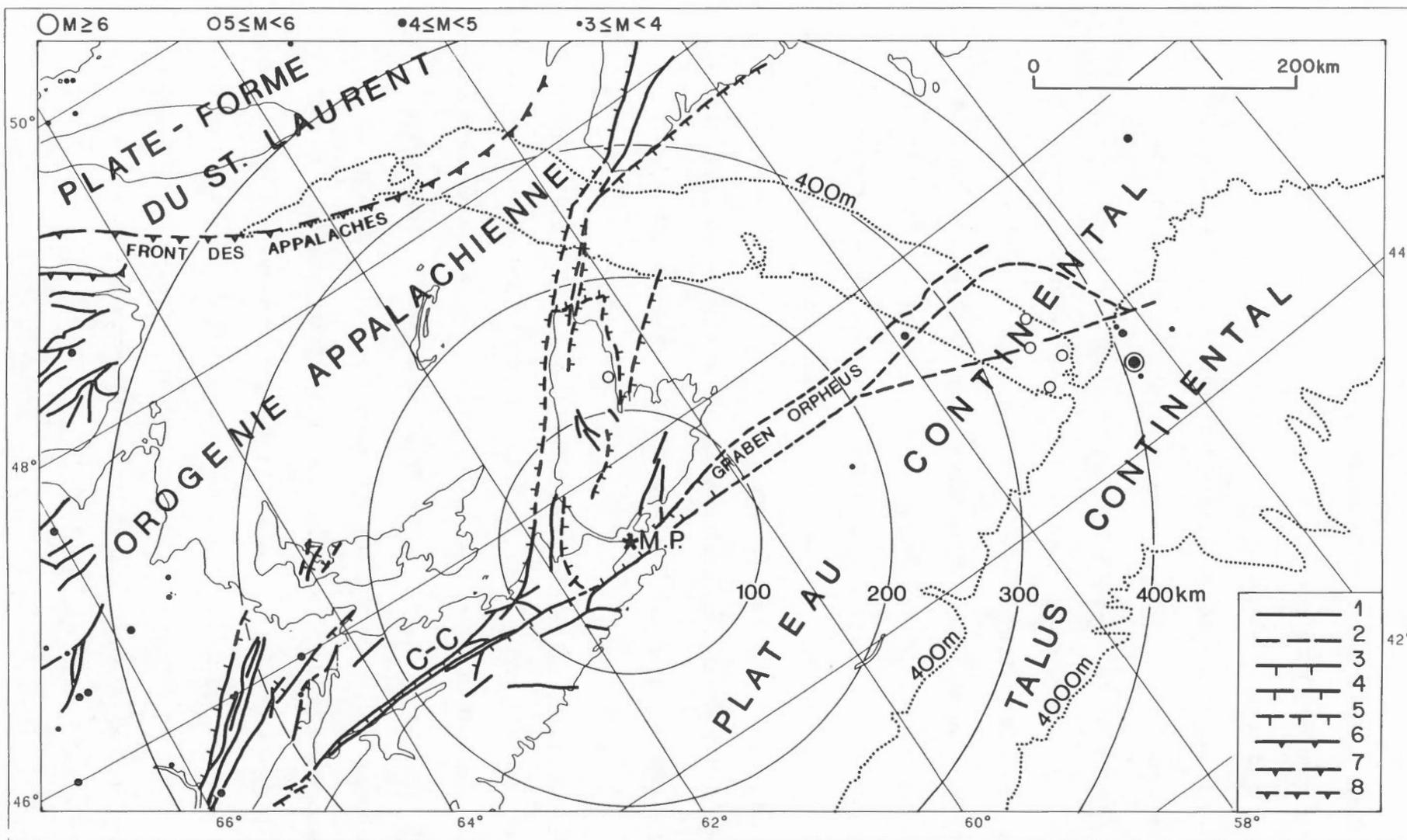


Figure 4. Séismicité et géologie de la région de Melford Point, Nouvelle-Ecosse (M.P.). Les épicesentres des tremblements de terre sont représentés par des points ou des cercles conformément à l'échelle de magnitude (M) donnée dans la partie supérieure de la figure. 1 - faille; 2 - faille supposée; 3 - faille normale; 4 - faille normale approximative; 5 - faille normale supposée; 6 - faille chevauchante; 7 - faille chevauchante approximative; 8 - faille chevauchante supposée (Sanford et coll., 1979; King et MacLean, 1976). Les isobathes 400 m et 4000 m délimitent respectivement la bordure du plateau continental et la base du talus continental. C-C est la zone faillée de Cobequid-Chédabouctou.

assigner une magnitude, et pour cet événement, l'intensité épiscopentrale fut convertie en une magnitude de 5.0 qui est celle symbolisée sur la figure 4. Quelques années plus tard, dans une étude de la sismicité de l'Est du Canada, Basham et coll. (1979) ont effectué une ré-évaluation préliminaire de cet événement. La région à travers laquelle il fut ressenti, "à travers le Cap-Breton", fut considérée comme un meilleur indicateur de son intensité et la magnitude fut réduite à 4.0 (voir tableau 1 de Basham et coll., 1979).

Mis à part le Cap-Breton qui dans une section ultérieure sera considéré comme faisant parti d'une zone de faible sismicité ou zone résiduelle de l'Est canadien, les tremblements de terre historiques les plus importants se sont produits sur le Grand Banc au Sud de Terre-Neuve, à environ 350 km de Melford Point, ainsi qu'au Nouveau-Brunswick à des distances de l'ordre de 250 km (voir aussi figure 2). Il sera démontré dans une section ultérieure que la zone du Grand Banc possède la plus forte influence sur l'estimation du risque sismique à Melford Point.

La région de la figure 4 se situe pratiquement entièrement dans les Appalaches canadiens qui sont formés de sédiments, volcaniques et intrusifs plissés d'âge Paléozoïque. Trois phases majeures de déformation ont affecté la région: la phase Taconique (Ordovicien), la phase Acadienne (Dévonien) et la phase Hercynienne (Permo-Carbonifère). La principale structure de la région est la zone faillée de Cobequid-Chédabouctou (d'âge Triasique ou plus ancien) qui passe environ à 20 km au Sud de Melford Point. Au large, prolongeant cette zone faillée et s'étendant de la Baie de Chédabouctou au lit du Saint-Laurent se trouve le graben Orphéus formé de couches plissées d'âge Crétacé (King et MacLean, 1970, 1976; King et coll., 1970).

La faible sismicité du Nord de la Baie de Fundy peut être associée de manière spatiale avec les structures de direction Nord-Est cartographiées dans la région (figure 4). Cependant, dans la partie Est du bassin d'âge Paléozoïque supérieur du centre du Nouveau-Brunswick, une sismicité de direction Nord-Est n'est associée spatialement avec aucune structure de rupture majeure de même direction et ayant une expression à la surface. Une telle sismicité pourrait très bien être associée dans l'espace à des structures enfouies sous le bassin. Aucune activité sismique connue n'est associée avec la zone faillée de Cobequid-Chédabouctou.

King et coll. (1970) suggèrent que la sismicité de la zone du Grand Banc pourrait être le résultat de rajustements le long de la faille Sud du graben Orphéus qui est la continuation en mer de la zone faillée de Cobequid-Chédabouctou. Cependant, les épicentres de la région du Grand Banc ne sont pas suffisamment précis pour permettre une corrélation définitive.

Dans un rapport préliminaire de reconnaissance géologique du site de Melford Point, la firme Fenco Consultants Ltd. (1980b) décela la présence de failles de direction Nord-Est sans évidence de mouvements récents; failles qui peuvent être une expression locale du plus important système de failles du Sud du Cap-Breton (figure 4). En résumé, il n'y a aucune preuve géologique récente pour supporter que d'éventuels tremblements de terre importants peuvent se produire à proximité immédiate de Melford Point.

3. ETUDE PROBABILISTE DES FORTS MOUVEMENTS SEISMIQUES DU SOL DANS L'EST  
CANADIEN

3.1 Carte de zonage du risque séismique de 1970

Afin d'établir les niveaux relatifs du risque séismique à travers le pays, la présente édition du Code national de bâtiment du Canada (Conseil national de recherches, 1980a) utilise la carte de zonage du risque séismique de 1970 (Figure 5), permettant ainsi de déterminer les exigences en matière de construction anti-séismique. La figure 5 basée sur l'accélération horizontale maximale avec une probabilité de dépassement de 0.01 par an, montre les courbes à 1,3 et 6% g divisant ainsi le pays en quatre zones de risque séismique. Au cours de la dernière décennie, la DPG, en tant que service aux utilisateurs de cette carte, a fourni des déterminations d'accélération horizontale maximale pour n'importe quel site. Ceci a été particulièrement important pour les régions de la zone 3 où les accélérations peuvent facilement dépasser la valeur minimale de 6% g du contour.

Les charges de calcul qui résultent des dispositions statiques du code furent originellement calibrées de manière empirique à partir des constructions de Californie. Le niveau de probabilité utilisé comme base de la carte de zonage, 0.01 par an ou probabilité de dépassement de 40% en 50 ans n'est cependant pas représentatif des charges de calcul séismiques spécifiées par le code; par exemple, les charges de calcul ont une plus faible, mais non spécifiée, probabilité d'être dépassées. C'est pour cette raison que la probabilité adoptée pour la carte devra être considérée comme une base quelque peu arbitraire mais utile pour l'évaluation des niveaux relatifs du risque à travers le pays.

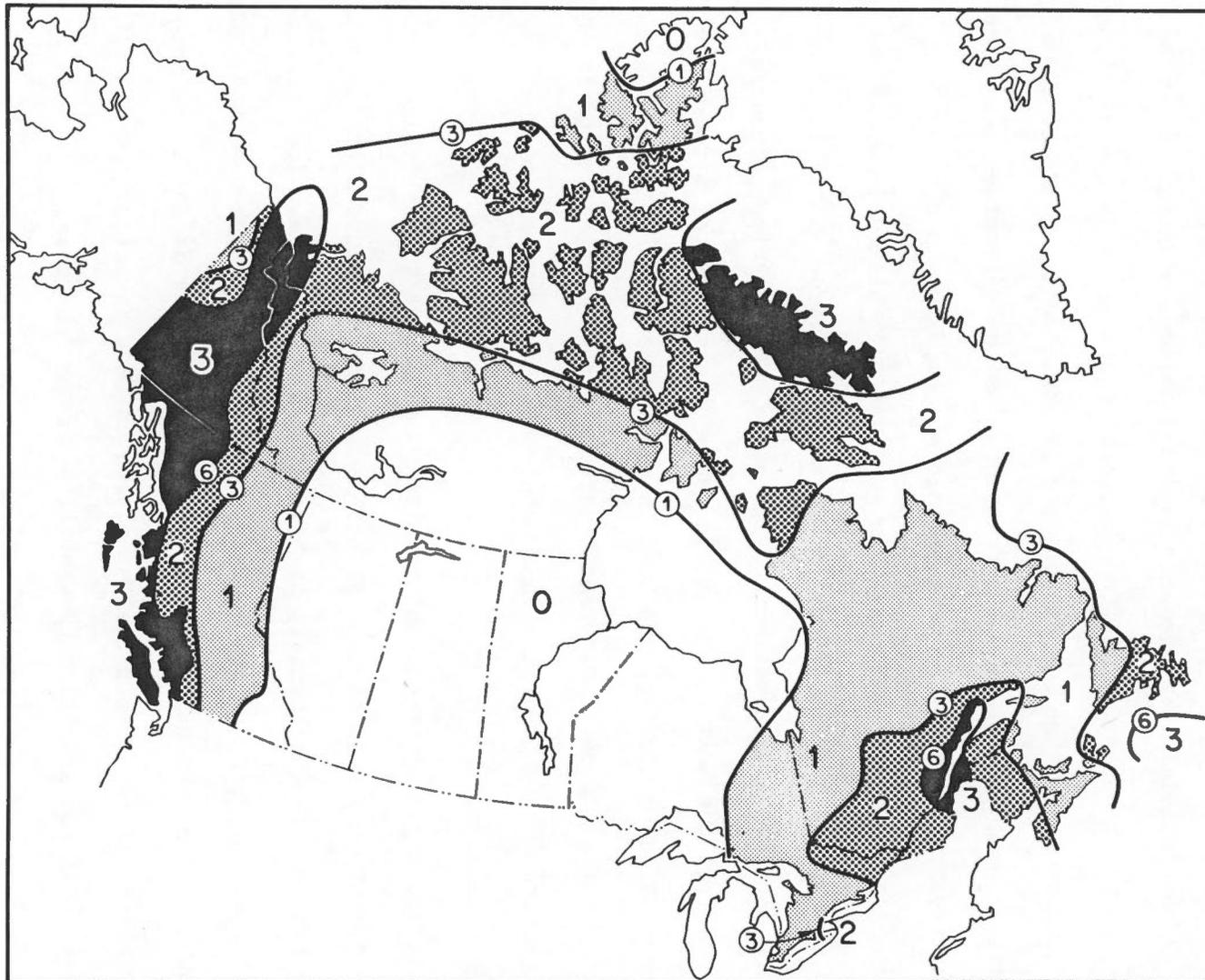


Figure 5. Carte de zonage du risque sismique du Canada de 1970. Les chiffres encadrés indiquent à la probabilité de 0.01 par année la valeur de l'accélération exprimée en % g. Les chiffres situés entre les contours se rapportent aux zones de risque sismique.

Cependant, les accélérations maximales montrées par la carte de zonage, ou les calculs équivalents pour un site spécifique sont fréquemment utilisés pour des usages indépendants du code avec la fausse idée que ceci procurera des niveaux de protection comparables à ceux fournis par le code. Pour les raisons mentionnées ci-dessus, ce n'est pas le cas.

Les techniques actuelles d'ingénierie normales ne permettent pas de conserver le concept de probabilité tout au long de la conception. Cependant, l'expérience suggère qu'une probabilité de dépassement de 10% en 50 ans est plus appropriée pour les calculs effectifs spécifiés dans le présent code. Cette probabilité a donc été choisie pour les nouvelles cartes de probabilité des mouvements du sol préparées par la DPG (Basham et coll., 1982), lesquelles serviront de base pour les nouvelles cartes de zonage du risque sismique de l'édition de 1985 du Code national du bâtiment.

### 3.2 Méthodologie actuelle du risque sismique

La carte de zonage de 1970 fut développée en utilisant la méthode des valeurs extrêmes appliquée à la sismicité historique afin de calculer la probabilité de dépassement de l'accélération en des sites formant une grille à travers tout le pays (Milne et Davenport, 1968). Une étude récente des méthodes d'estimation du risque sismique (Weichert et Milne, 1979) a montré que la méthode développée par Cornell (1968) serait la plus appropriée pour la préparation des nouvelles cartes. En particulier, afin de définir des zones sismiques de dimensions finies la méthode de Cornell permet l'incorporation d'informations géologiques, lorsque celle-ci sont

disponibles. Par opposition, la méthode des valeurs extrêmes assume implicitement que les grands tremblements de terre futurs se produiront aux mêmes endroits que les événements historiques.

Une description schématique de la présente méthode est donnée dans la figure 6. La région considérée est divisée en un ensemble de zones séismiques basées sur la distribution de la séismicité historique et récente ainsi que sur l'information géologique et/ou tectonique pouvant servir à délimiter la future activité séismique (figure 6a). Pour chacune des zones, des relations de récurrence de la magnitude sont développées (Figure 6b) en fonction de la fréquence estimée des tremblements de terre passés. Nous avons utilisé la méthode de Weichert (1980) pour dériver des relations de la forme:

$$N (\geq M) = N_0 e^{-\beta M} (1 - e^{-\beta (M_x - M)}) \quad (1)$$

où  $N$  est le nombre cumulatif par année de tremblements de terre supérieurs ou égaux à la magnitude  $M$ . Le terme de droite de l'équation (1) termine la relation cumulative à une magnitude maximale  $M_x$ .

Les relations d'atténuation qui prédisent les mouvements du sol en fonction de la magnitude et de la distance (Figure 6c) sont nécessaires pour la cartographie des paramètres des mouvements du sol. Les cartes de la DPG montrent à la fois l'accélération ( $a_p$ ) et la vitesse ( $v_p$ ) horizontales maximales en utilisant les relations d'atténuation développées par Hasegawa et coll. (1981). Pour l'Est du Canada, ces relations sont de la forme:

$$a_p \text{ (cm s}^{-2}\text{)} = 3.4 e^{1.3M} R^{-1.1} \quad (2)$$

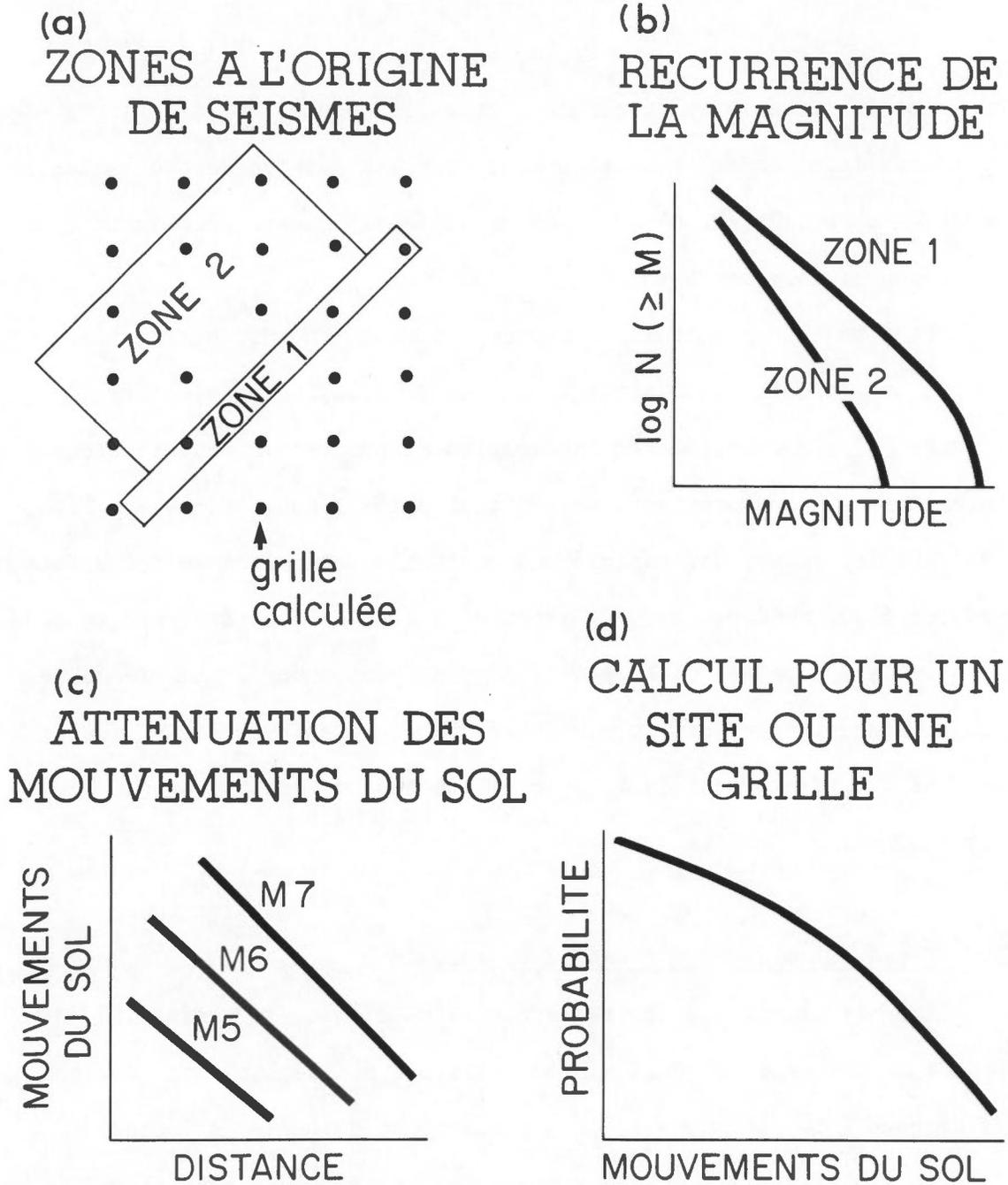


Figure 6. Schéma de la méthode d'étude probabiliste des mouvements sismiques du sol montrant: (a) les zones à l'origine des tremblements de terre (ou zones sismiques) et la grille calculée; (b) les courbes de récurrence de la magnitude terminées à une magnitude limite supérieure ( $M_x$ ); (c) l'atténuation des mouvements du sol; et (d) la distribution de la probabilité du paramètre des mouvements du sol pour un site ou une grille.

$$v_p \text{ (cm s}^{-1}\text{)} = 0.00018 e^{2.3M} R^{-1.0} \quad (3)$$

où R est la distance hypocentrale. Pour les besoins de la cartographie de la probabilité des mouvements du sol, tous les séismes de toutes les zones séismiques de l'Est du Canada sont considérés comme se produisant à une profondeur focale de 20 km.

Pour un site particulier ou pour chacun des points de la grille d'une carte, une fonction de distribution à la probabilité de dépassement (figure 6d) est calculée par intégration numérique des contributions des paramètres des mouvements du sol de toutes les zones pertinentes. Pour ces calculs, nous avons employé une adaptation du programme d'ordinateur développé par McGuire (1976) (Basham et coll., 1982). Les résultats de l'ensemble des points de la grille peuvent être montrés sous forme de carte hypsométrique soit du paramètre des mouvements du sol à une probabilité fixée, soit de la probabilité des mouvements du sol à un niveau fixé.

### 3.3 Zones séismiques de l'Est du Canada

Pour le calcul des nouvelles cartes du risque, la séismicité du Canada et des régions avoisinantes actives a été découpée en 32 zones séismiques. La région de l'Est du Canada est découpée en 7 zones séismiques (figure 7). Chacune des zones de la figure est identifiée par un code à trois lettres ainsi que par les coefficients de récurrence de la magnitude dans l'ordre suivant:  $\beta$ ,  $N_0$  et  $M_x$  (équation 1). La rationalisation de cette sélection de zones séismiques est donnée dans Basham et coll. (1982) et ne sera pas répétée ici. Cependant, dans une

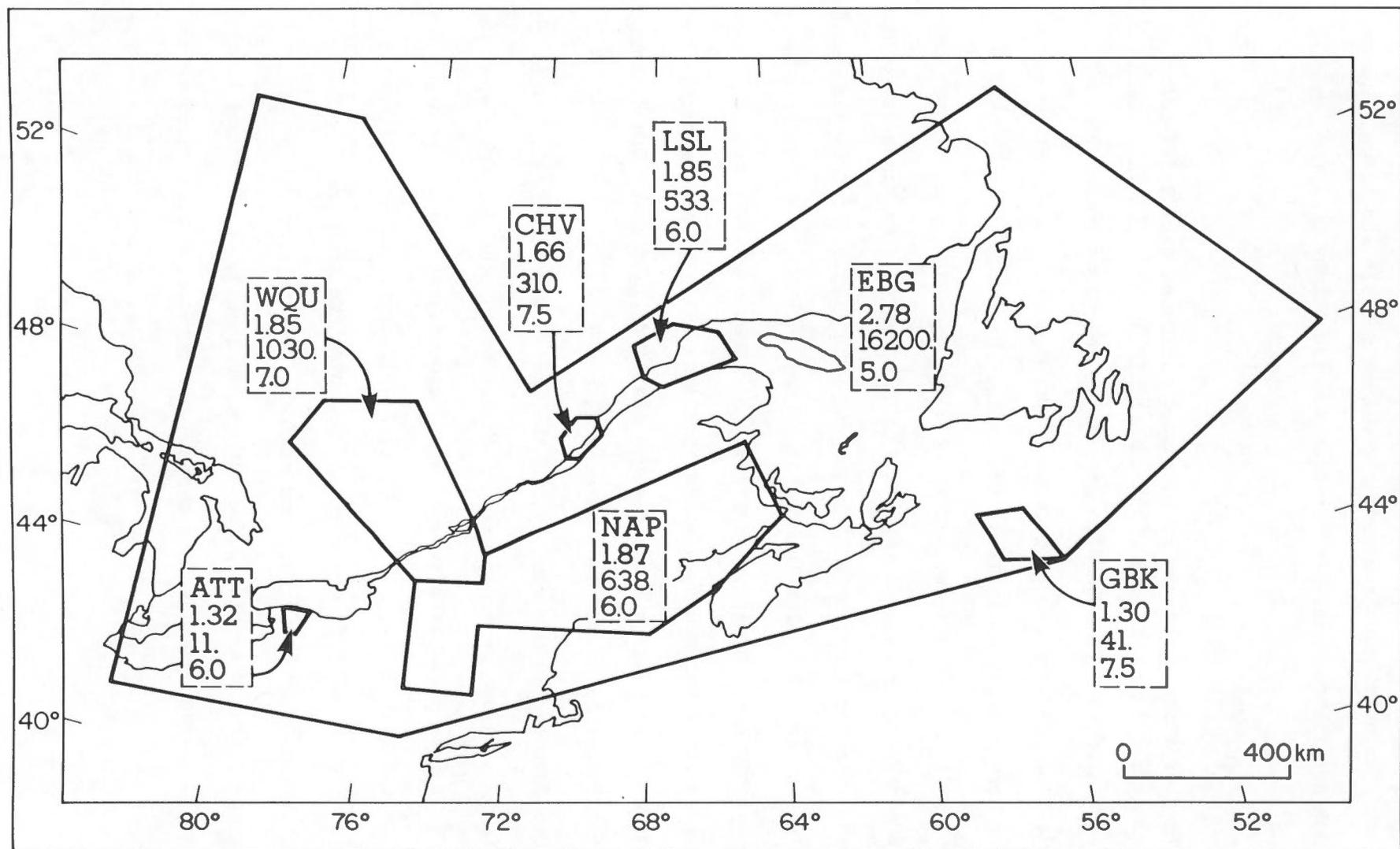


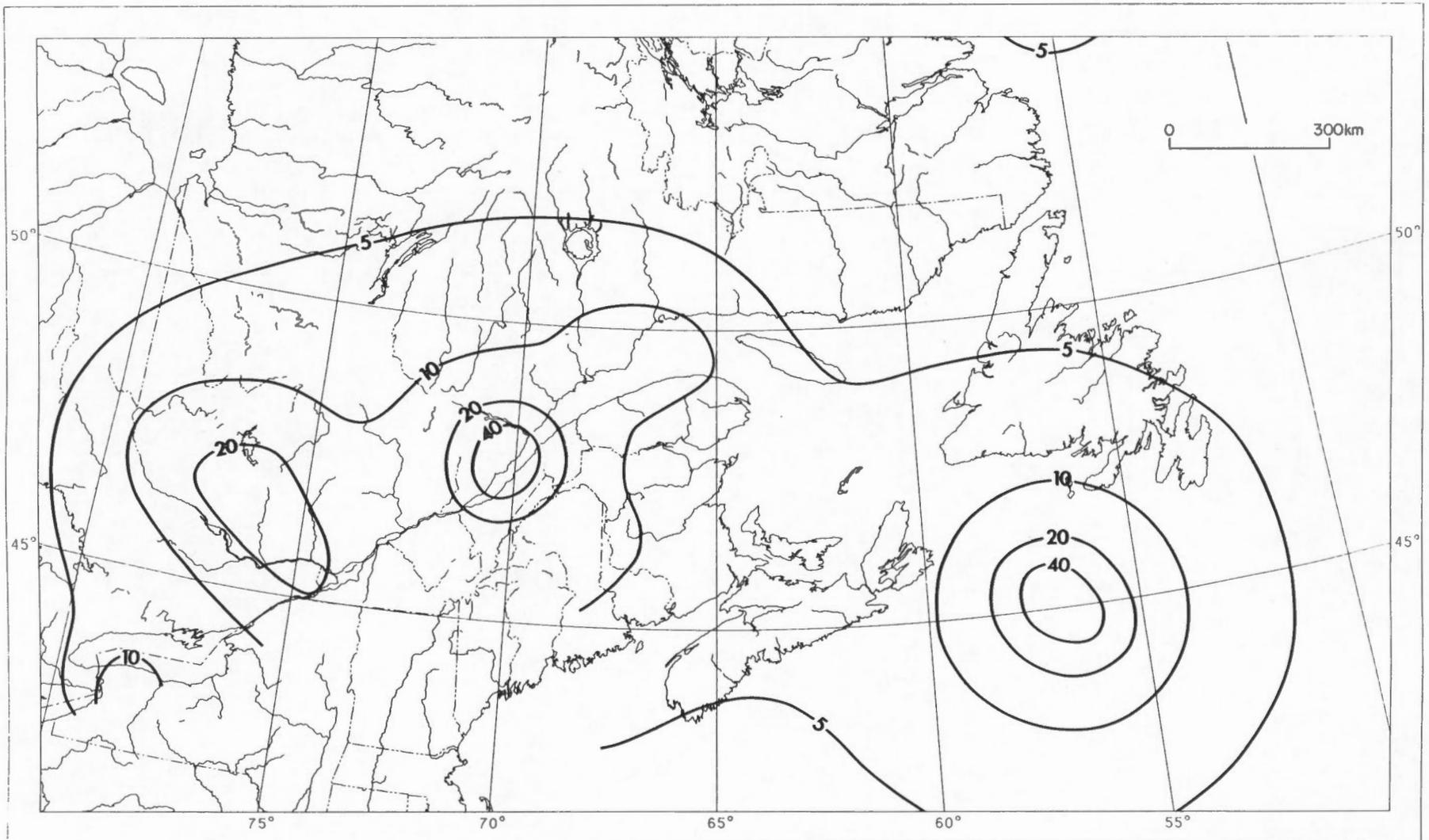
Figure 7. Zones sismiques de l'Est du Canada libellées avec leur code et les coefficients  $\beta$ ,  $N_0$  et  $M_x$  (équation 1) de récurrence de la magnitude (adaptée de Basham et coll., 1982). ATT: Zone d'Attica; CHV: Zone de Charlevoix; EBG: Zone résiduelle de l'Est canadien; GBK: Zone du Grand Banc; LSL: Zone du bas Saint-Laurent; NAP: Zone des Appalaches du Nord; WQU: Zone de l'Ouest québécois.

section ultérieure, nous traiterons quelques détails additionnels des zones les plus pertinentes pour l'estimation du risque à Gros Cacouna et à Melford Point.

### 3.4 Accélération et vitesse horizontales maximales dans l'Est canadien à une probabilité de dépassement de 10% en 50 ans

La région de l'Est Canadien des cartes de risque de la DPG est montrée dans les figures 8 et 9 respectivement pour l'accélération et la vitesse horizontales maximales. Ces cartes reflètent la sismicité régionale (figure 2) qui est représentée de façon plus générale par le modèle des zones sismiques (Figure 7). Clairement, les zones les plus actives, et en particulier celles qui ont expérimenté les tremblements de terre historiques les plus importants, Charlevoix (CHV) et le Grand Banc (GBK) correspondent à des petites régions à très haut risque. L'accélération atteint une valeur maximale de 65% g au centre de la zone de Charlevoix et environ 61% g près du centre de la zone du Grand Banc; la vitesse dépasse  $40 \text{ cm s}^{-1}$  pour chacune de ces zones.

Ces deux cartes montrent la probabilité de vibration du sol dans deux principaux domaines de fréquences, l'accélération pour des fréquences de l'ordre de 5 Hz et la vitesse pour des fréquences de l'ordre de 1 Hz (voir aussi Hasegawa et coll., 1981). Elles fournissent donc une information sur les niveaux relatifs des vibrations pouvant se produire, respectivement pour des structures rigides et des structures plus importantes, plus flexibles possédant des fréquences de résonance plus basses. La façon dont ces deux cartes, une fois converties en carte de zonage seront employées pour les exigences de calcul pour les deux types



**Figure 8.** Accélération horizontale maximale (% g) pour l'Est du Canada à la probabilité de dépassement de 10% en 50 ans.

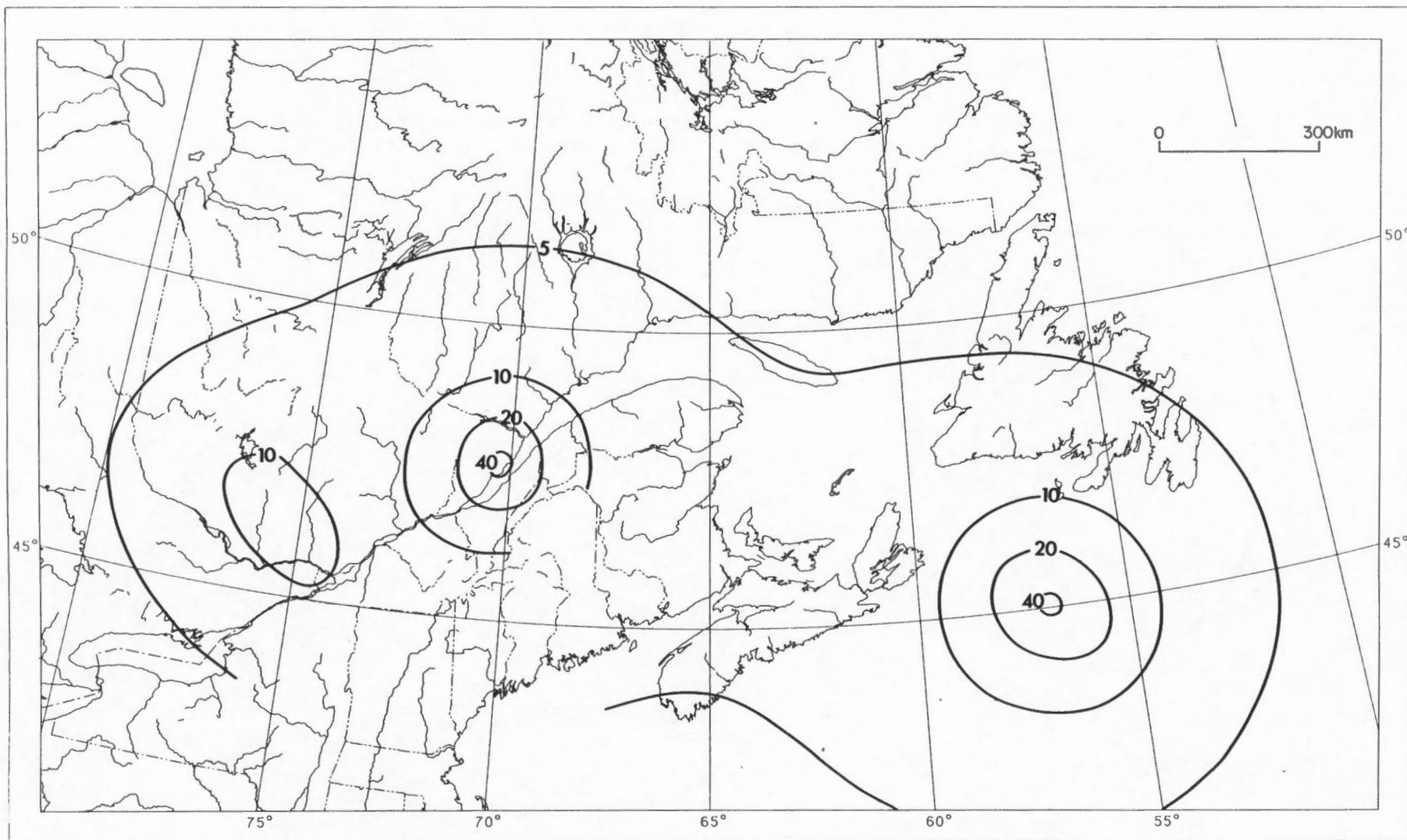


Figure 9. Vitesse horizontale maximale ( $\text{cm s}^{-1}$ ) pour l'Est du Canada à la probabilité de dépassement de 10% en 50 ans.

généraux de structures dans le cadre de l'édition révisée du Code national du bâtiment n'a pas encore été finalisée, bien que des recommandations soient en cours de développement (Heidebrecht et coll., 1982).

#### 4. RISQUE SEISMIQUE A GROS CACOUNA, QUEBEC

##### 4.1 Etude probabiliste des mouvements sismiques du sol

Gros Cacouna est situé très près de la ligne 40% g de la figure 8, et entre les lignes 20 et 40  $\text{cm s}^{-1}$  de la figure 9. Un calcul de l'accélération et de la vitesse maximales en fonction de la probabilité pour le site lui-même (47.94°N, 69.51°W) est montré dans la figure 10. La validité de la probabilité de mouvement maximal du sol comme estimation utile du risque sismique, à besoin cependant d'être évaluée très soigneusement pour des emplacements situés près des zones de haute sismicité.

Bien que tout calcul soit dépendant du modèle assumé (limites de zones, récurrence de la magnitude et atténuation) il le devient encore plus pour de faibles probabilités. Le degré d'incertitude dans un modèle de zones, ou la "probabilité" que le modèle soit une représentation incorrecte des tremblements de terre futurs, bien que non quantifiable, devient plus grand que la probabilité de mouvement du sol venant d'être calculée. De plus les mouvements du sol à faible probabilité sont produits par des séismes eux-mêmes à faible probabilité et le résultat devient particulièrement sensible au choix de la magnitude maximale ( $M_x$ ) et à la forme de la courbe de récurrence lorsqu'elle approche  $M_x$ . De fortes valeurs des mouvements du sol, par exemple, supérieures à 60% g et 60  $\text{cm s}^{-1}$  sur la figure 10 peuvent seulement être produites relativement

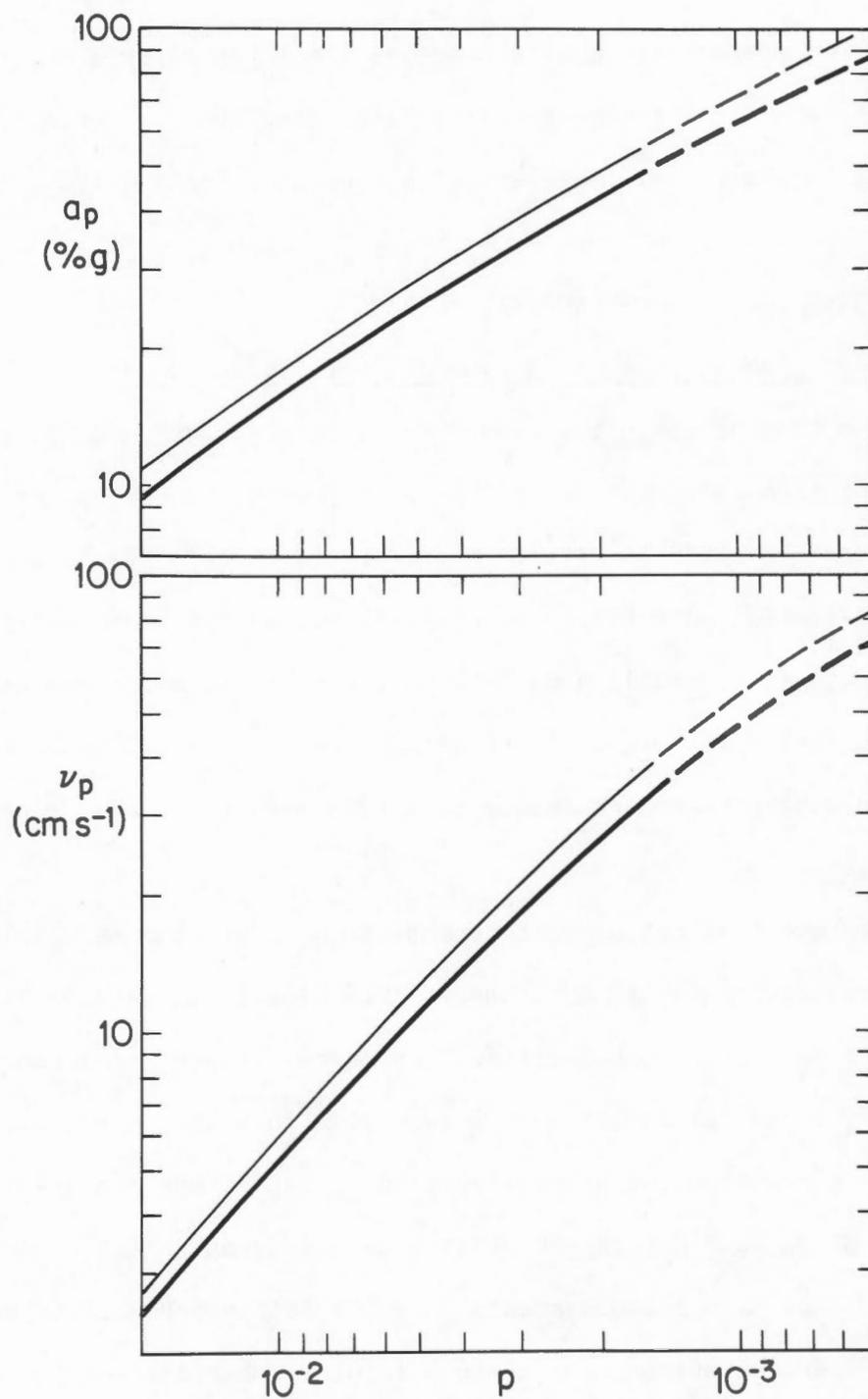


Figure 10. Accélération ( $a_p$ , diagramme supérieur) et vitesse ( $v_p$ , diagramme inférieur) horizontales maximales en fonction de la probabilité de dépassement ( $p$ ) pour Gros Cacouna (emplacement nominal:  $47.94^{\circ}\text{N}, 69.51^{\circ}\text{O}$ ). Le trait épais correspond au calcul suivant la zone régionale CHV (figure 7) et le trait fin correspond au calcul suivant la zone confinée de CHV (figure 12).

près des grands séismes, dans le cas de Gros Cacouna par des séismes importants de la zone de Charlevoix. Hasegawa et coll. (1981) ont attiré l'attention sur le fait que les équations (2) et (3) sont si pauvrement vérifiées dans l'intervalle forte magnitude-faible distance qu'elles devraient être utilisées avec beaucoup de précaution dans la prédiction des forts mouvements du sol.

A la lumière de ce qui précède, ce type d'estimation probabiliste n'est pas considéré comme adéquate pour satisfaire la publication Z276 de l'ACNOR (Association canadienne de normalisation 1981) dans laquelle un tremblement de terre dont les effets entraînent une fermeture sans danger ("Safe Shutdown Earthquake") produirait "des mouvements du sol ayant un intervalle moyen de récurrence de 10 000 ans". (L'avis de la DPG est que nulle part au Canada une telle estimation peut être effectuée de manière satisfaisante.) L'alternative proposée par la publication CSA (ACNOR) Z276 "pour les régions où les incertitudes sont difficiles à quantifier" est une approche déterministe pour l'estimation "des mouvements du sol maximums crédibles au site", ce qui sera discuté dans la section suivante.

Il y a cependant une utilisation des estimations probabilistes des mouvements du sol qui est appropriée à certaines infrastructures d'un terminal de regazéification. La publication Z276 de l'ACNOR spécifie un tremblement de terre dont les effets permettent la poursuite des opérations du terminal ("Operating Base Earthquake") comme possédant "un intervalle moyen de récurrence de 475 années" lorsque dérivé de façon probabiliste, ou alors possédant des mouvements du sol égaux à la moitié de ceux d'un tremblement de terre dont les effets entraînent une fermeture sans danger lorsque dérivé de façon déterministe. Nous estimons que les

estimations probabilistes fournies par les cartes de risque de la DPG, à la probabilité de dépassement de 10% en 50 ans (ce qui équivaut à un intervalle de récurrence de 475 ans) sont parfaitement applicables à ce sujet. Ainsi, les mouvements du sol à prendre en considération pour la conception de l' "Operating Base Earthquake" de Gros Cacouna auraient une accélération maximale d'environ 40% g et une vitesse maximale de  $25 \text{ cm s}^{-1}$ .

Pour l'élaboration des spectres de réponse, les nouveaux résultats probabilistes fournis par la DPG sur les mouvements du sol permettent à la fois pour les valeurs limites de l'accélération et de la vitesse des mouvements du sol d'être déterminées indépendamment en choisissant ces deux paramètres à un risque égal pour un site particulier. La figure 11 montre de telles limites pour Gros Cacouna à la probabilité de dépassement de 10% en 50 ans. Hasegawa et coll. (1981) n'ont pas déterminé de relations d'atténuation du déplacement maximum pour le Canada parce qu'ils considèrent que les données disponibles pour ce paramètre ne sont pas suffisantes. En conséquences, les valeurs limites du déplacement de la figure 11 sont fixées arbitrairement à l'intersection déplacement-vitesse pour une fréquence de 0.2 Hz (5 sec) telles qu'adoptées par le Conseil national de recherches (1980b). Bien que des relations d'atténuation du déplacement maximal pour l'Ouest des EU soient disponibles dans la littérature (par exemple, Trifunac, 1976) une tentative rigoureuse de définition précise des limites de déplacement à basses fréquences au site de Gros Cacouna ne sera effectuée que si certaines des structures de l'usine de regazéification possèdent des fréquences de résonance inférieures à environ 0.2 Hz. Les facteurs de multiplication typiques

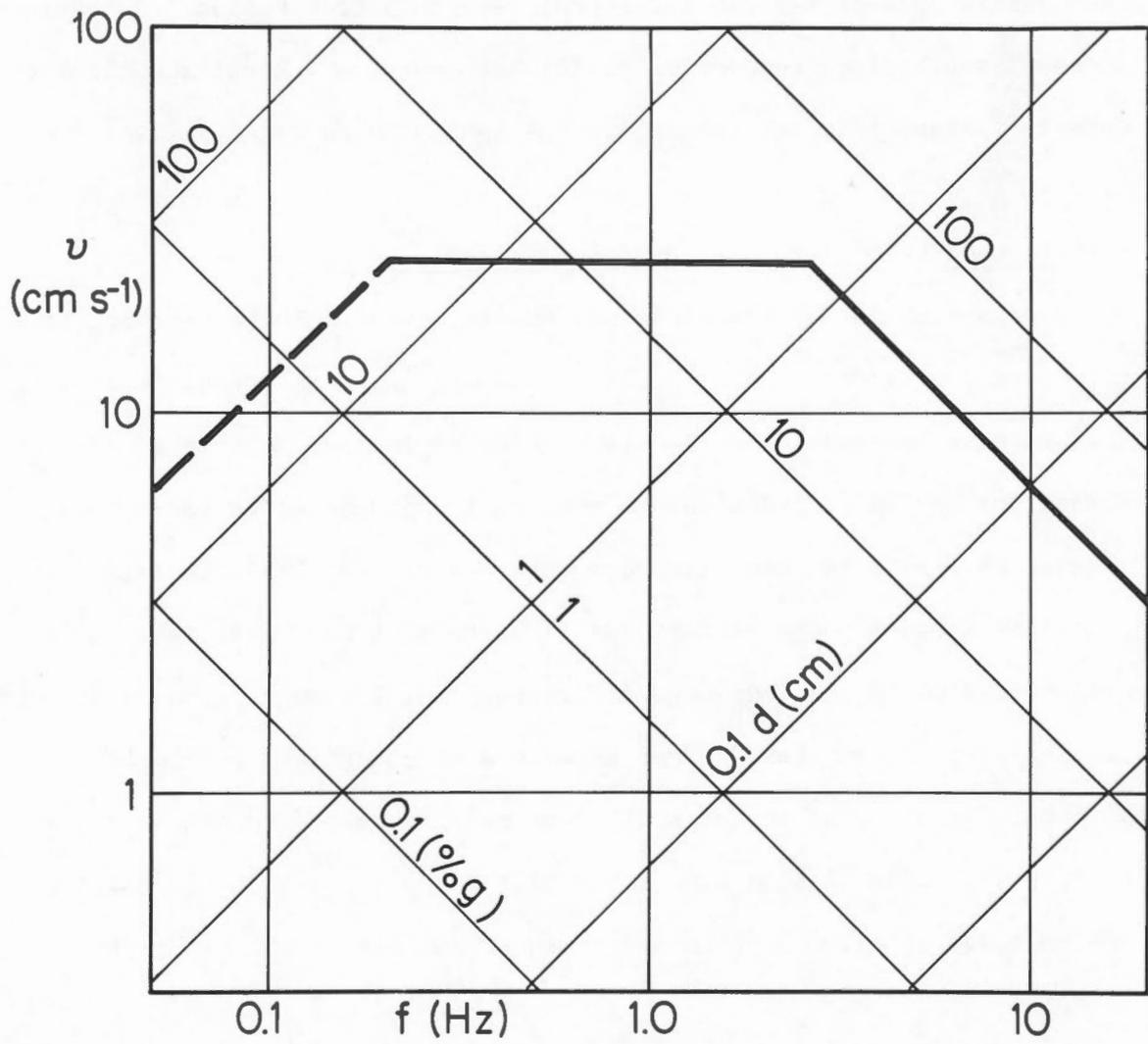


Figure 11. Limites maximales des mouvements du sol à Gros Cacouna à la probabilité de dépassement de 10% en 50 ans devant être utilisées dans l'élaboration des spectres de réponse.

sont donnés dans le tableau K-1 du supplément du Code national du bâtiment (Conseil national de recherches, 1980b) et pour les centrales nucléaires dans le tableau 1 de la publication CAN 3-N289.3M de l'ACNOR (1981b).

#### 4.2 Etude déterministe des mouvements sismiques du sol

Une estimation déterministe des mouvements sismiques conceptuels du sol devrait à la fois tenir compte du site et des structures: elle devrait considérer l'influence des conditions locales du site et des fondations sur la propagation des mouvements sismiques du sol; et elle devrait essayer d'estimer les mouvements du sol dans les intervalles de fréquence auxquels répondraient les structures et les installations critiques d'un terminal de regazéification. Ni les conditions du site pas plus que les intervalles de fréquence ne sont connus des présents auteurs. Ainsi, dans ce qui suit, nous ne pouvons présenter que quelques descriptions générales du type de mouvements du sol déterminés de façon déterministe et qui pourraient s'appliquer aux installations de Gros Cacouna.

La figure 12 est une carte à petite échelle de la région de Charlevoix. Les microséismes de cette zone ont été enregistrés de façon continue au cours des quatre dernières années à l'aide d'un réseau de télémessure de six sismographes. La distribution épiscopentrale au cours de cette période a été très similaire à celle observée lors d'une courte expérience en 1970 puis lors d'une expérience de deux mois en 1974 (Leblanc et Buchbinder, 1977; Anglin et Buchbinder, 1981). Ceci indique que la distribution a été spatialement stationnaire pendant une période d'au moins une décennie. La seule comparaison entre la microsismicité et

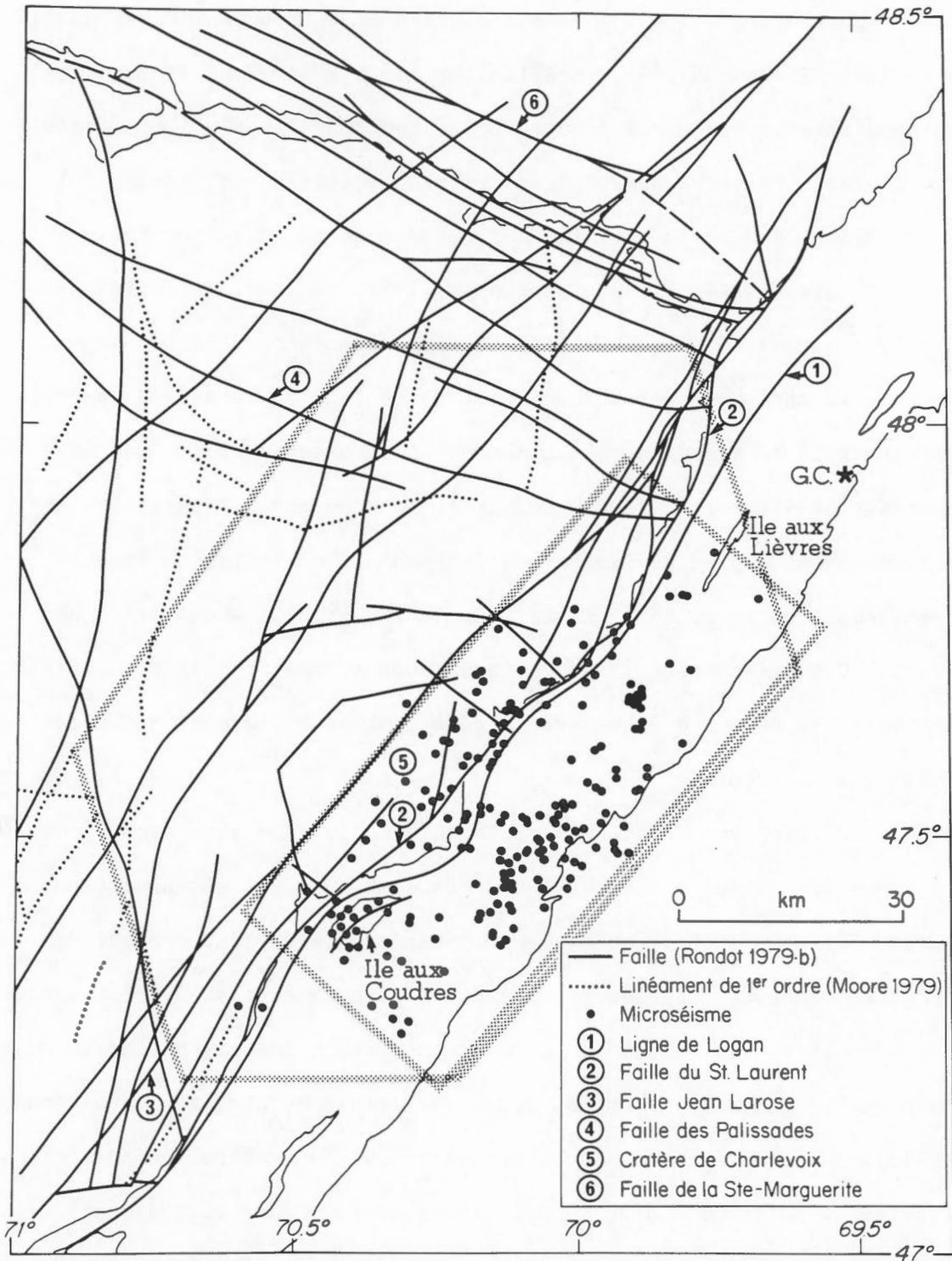


Figure 12. Microséismes et principales structures de la région de la zone sismique de Charlevoix. Le grand polygone représente la zone sismique utilisée dans le modèle régional (figure 7); le rectangle représente un modèle alternatif de la zone sismique basé sur la distribution de la microsismicité.

les séismes historiques importants pouvant être faite est basée sur le travail de Stevens (1980). Les limites amont et aval de la zone de microsismicité sont très proches des épicentres des plus importants tremblements de terre du vingtième siècle localisés par Stevens aux terminaisons Sud-Ouest de l'Ile aux Coudres et de l'Ile aux Lièvres.

L'examen par Anglin et Buchbinder (1981) de la distribution hypocentrale de la microsismicité indique que la zone active semble limitée au Nord-Ouest et au Sud-Est par des failles parallèles au fleuve affectant le Précambrien, et plongeant abruptement vers le Sud-Est. Hasegawa et Wetmiller (1980) choisirent le plan nodal P parallèle au fleuve comme le plan de faille préféré pour le mécanisme chevauchant du tremblement de terre du 19 Août 1979 s'étant produit à une profondeur de 10 km. Cet événement et ses répliques sont montrés sur la figure 12 par le petit groupement d'épicentres situés dans la rivière au Sud-Ouest de l'Ile aux Lièvres.

La plupart des structures visibles à la surface sont dans le domaine du vieux Grenville (Rondot, 1979b). Ce sont des failles parallèles au fleuve Saint-Laurent ou au Saguenay. Les premières sont probablement d'âge Précambrien Supérieur et associées avec le rift du Saint-Laurent (Kumarapeli et Saull, 1966). Les secondes étant associées avec le graben du Saguenay qui s'est formé au cours de l'orogénie appalachienne (Rondot, 1979b). Superposé à ces structures on trouve le cratère météoritique de Charlevoix qui s'est formé au Dévonien Supérieur (Rondot, 1979a,b).

Les microséismes ne sont pas distribués uniformément à travers le cratère, pas plus qu'ils ne sont confinés aux structures associées au cratère. Cependant, l'association des structures du cratère et des

structures du rift plus ancien semble contrôler la zone sismique dans sa terminaison amont près de l'Ile aux Coudres. En aval, les microséismes tendent à diminuer près de la limite Sud de l'Ile aux Lièvres, là où les failles les plus au Sud du graben du Saguenay coupent la rive Nord. Toutes les informations disponibles montrent que le graben du Saguenay est aséismique (voir aussi figure 2 qui peut inclure quelques épicentres pauvrement localisés). Les structures du graben du Saguenay ne sont pas cartographiées dans le fleuve, mais lors de la reconnaissance géologique de Gros Cacouna, la firme Fenco Consultants Ltd. (1980a) a mentionné en amont du site la présence possible de joints ou failles quasi verticaux dont la direction est similaire à celles du graben et qui pourraient lui être reliés. La zone aséismique s'étend à travers la rivière marquant ainsi la limite aval de la zone active.

Le grand polygone de la figure 12 qui délimite la zone de Charlevoix telle qu'employée dans le modèle régional (figure 7) est basé principalement sur la distribution de la sismicité historique (Basham et coll., 1982). Le rectangle de la figure 12 est un modèle alternatif plus confiné basé sur la distribution de la microsismicité discutée précédemment. Pour l'estimation du risque à Gros Cacouna, ce second modèle est le modèle préféré pour la zone de Charlevoix; en effet, nous assumons que les grands séismes ont été et continueront d'être confinés à cette région rectangulaire.

Les effets de l'emploi du modèle de Charlevoix le plus confiné sur l'estimation probabiliste des mouvements du sol sont montrés dans la figure 10 par les courbes de la partie supérieure. A cause de la position de Gros Cacouna par rapport aux deux modèles, les résultats sont très similaires.

Les mouvements maximums crédibles du sol seront produits par un important tremblement de terre se produisant dans la zone de Charlevoix. Les questions qui demandent réponse sont: de quelle importance, et à quelle distance?

De quelle importance? La limite supérieure de la magnitude utilisée pour la relation de récurrence de la magnitude pour le zone de Charlevoix (figure 13a) est 7.5. Comme pour toutes les zones sismiques, elle fut choisie comme supérieure d'une 1/2 unité à la magnitude du plus important événement historique. Les magnitudes des plus importants séismes de la zone de Charlevoix méritent d'être discutées.

Les deux plus importants séismes historiques furent les événements de 1663 et 1925 (Smith, 1962). Les conséquences de l'événement de 1663 sont principalement dominées par des glissements de terrain. Bien que ces glissements de terrain soient de pauvres indicateurs de la sévérité d'un séisme (parce qu'ils peuvent se produire sans avoir été initiés par un tremblement de terre), ils sont inclus dans la description des effets d'une intensité X sur l'échelle d'intensité modifiée de Mercalli et pour cette raison, Smith assigna à ce séisme une intensité épiscopale de X. Au moment de la préparation du fichier des épiscopales des tremblements de terre canadiens, cette intensité épiscopale fut convertie en une magnitude de 7.7.

La tremblement de terre de 1925 s'est vu assigner par Smith une intensité épiscopale de IX et un magnitude instrumentale (onde de surface) de 7. Dans une étude préliminaire de ce tremblement de terre (A.E. Stevens, données non publiées, 1976) il ne fut trouvé aucune raison pour douter de cette magnitude instrumentale qui est consistante avec

l'intensité maximale rapportée. Par ailleurs, Street et Turcotte (1977) ont utilisé les données instrumentales pour déterminer une magnitude  $m_b(L_g)$  de 6.6. Le problème de l'utilisation de différentes échelles de magnitude et comment elles peuvent refléter différentes mesures de propagation des mouvements du sol pour des intervalles de fréquence d'intérêt pour l'ingénierie dans le cadre du risque sismique, est une question très difficile (voir aussi Hasegawa et coll., 1981). Il est peut-être suffisant de mentionner ici que pour une cartographie probabiliste des mouvements du sol, il est assumé que, en-dessous du niveau de saturation de 7.5, chacune des échelles de magnitude employées pour les tremblements de terre canadiens prévoit des mouvements du sol identiques et ce jusqu'à des fréquences aussi basses que 1 Hz. La différence entre les magnitudes calculées à partir des ondes de surface ou des ondes  $L_g$  dans le cas du séisme de 1925 est cependant typique des incertitudes associées à cette hypothèse.

Lorsque possible, une comparaison des effets rapportés à plus grande distance (sauf le phénomène des glissements de terrain) des séismes de 1663 et 1925 est incluse dans l'étude de la sismicité de l'Est canadien par Basham et coll. (1979). Bien que le pouvoir de résolution d'un tel genre de données soit faible, les deux tremblements de terre furent estimés comme étant très similaires avec une faible tendance pour de séisme de 1663 à avoir produit des intensités plus grandes. Pour ce qui est du dénombrement des tremblements de terre de la zone de Charlevoix pour l'établissement de la relation de récurrence de la magnitude (figure 13a), ces deux séismes se sont vus associer une magnitude de 7.

La magnitude maximale que peut avoir un tremblement de terre de la zone de Charlevoix peut être établie sur la base de la rupture maximale

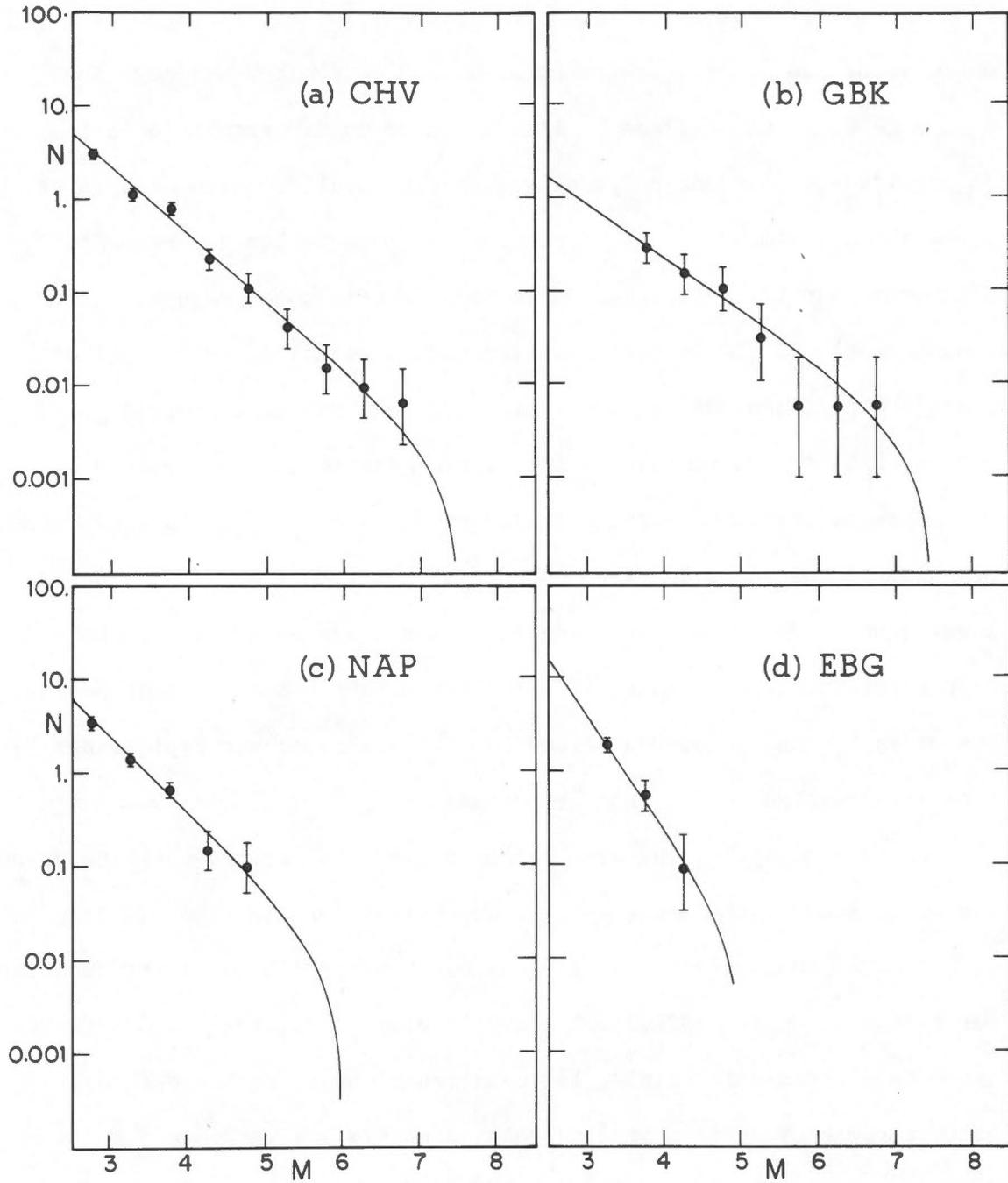


Figure 13. Courbes de récurrence de la magnitude pour les principales zones sismiques influençant le risque sismique à Gros Cacouna et à Melford Point. N est le nombre cumulatif annuel d'événements de magnitude M. Adaptées de Basham et coll. (1982). Voir figure 7 pour dénomination des zones et valeurs des coefficients de récurrence de la magnitude.

associée à une faille. Si on assume que l'étendue de la zone de microsismicité (figure 12) est un indicateur de la dimension des failles pré-existantes, et qu'un système de failles de la longueur de la zone ait été produit par un seul tremblement de terre, ce système aurait une longueur d'environ 80 km. De plus comme les microséismes tendent à être à peu près uniformément distribués entre 5 et 20 km de profondeur (Anglin et Buchbinder, 1981), une telle faille devrait s'exprimer à la surface (peut-être principalement dans la rivière). Il semble donc raisonnable d'affecter à cette faille une profondeur de 20 km donnant ainsi une surface maximale de faille de  $1600 \text{ km}^2$ .

Si on adopte comme chute de contrainte la seule estimation disponible pour la zone de Charlevoix, c'est-à-dire 5 MPa déterminée pour le séisme de magnitude 5 du 19 Août 1979 (Hasegawa et Wetmiller, 1980), les relations empiriques de Kanamori et Anderson (1975) utilisant une contrainte apparente d'environ 2 MPa ( $\leq 1/2$  de la chute de contrainte), indiquent qu'un tel tremblement de terre aurait une magnitude à partir des ondes de surface d'environ 7.5.

Ceci est notre meilleure estimation pour le séisme "crédible" le plus important pouvant se produire dans la zone de Charlevoix. Cette valeur est (principalement intuitivement) supportée par le fait que les ruptures les plus importantes, produisant des magnitudes approchant 8, semblent se produire seulement dans les régions où l'interaction entre les plaques est la plus importante. On doit mentionner que quand une  $M_x$  de 7.5 est utilisée pour terminer la relation de récurrence cumulative de la magnitude (figure 13a) sa probabilité est nulle, c'est-à-dire que c'est un événement inconcevable.

A quelle distance? Le point de la zone confinée de Charlevoix le plus proche de Gros Cacouna se trouve à environ 17 km (figure 12). Afin de considérer l'emplacement d'un séisme important pour l'estimation de ses effets à Gros Cacouna, il est important de considérer les dimensions finies de la zone de rupture. Stevens (1980) a montré que les séismes les plus importants de la zone de Charlevoix au cours de ce siècle ont des épicentres possédant des incertitudes de 15 à 20 km et sont situés à l'une ou l'autre des extrémités de la zone. L'emplacement estimé pour l'extrémité Nord-Est est la terminaison Sud de l'Ile aux Lièvres. Pour un séisme important l'épicentre est considéré comme étant la projection à la surface du premier point de rupture. Ainsi, pendant le tremblement de terre de 1925 la rupture peut être considérée comme ayant été initiée près de l'Ile aux Lièvres et s'étant propagée sur une distance inconnue, principalement vers le Sud-Ouest. Nous attirons l'attention sur le fait qu'il n'existe aucune preuve directe que ce fut le cas ou qu'il n'y a pas par exemple une faille pré-existante orientée perpendiculairement à la rivière et qui fut le foyer de ce séisme ou d'autres séismes importants. Néanmoins l'emplacement au Sud-Ouest de l'Ile aux Lièvres, à une distance d'environ 25 km semble être un emplacement raisonnable pour un tremblement de terre servant à fixer les normes anti-séismiques de construction à Gros Cacouna.

Pour illustrer ce qui a été dit précédemment, à savoir que les équations (2) et (3) ne sont pas appropriées à la prédiction des mouvements maximums du sol à proximité immédiate des tremblements de terre importants, ces relations prédisent par exemple  $144\% g$  et  $192 \text{ cm s}^{-1}$  pour une magnitude 7.5 avec une profondeur focale de 15 km à une distance

épicentrale de 25 km. Des accélérations du sol supérieures à 1 g n'ont été enregistrées que deux fois: sur les enregistrements horizontaux de Pacoima Dam lors du séisme de 1971 de San Fernando, Californie, à environ 3 km de la rupture; et sur l'enregistrement vertical de la station 6 d'El Centro lors du séisme de 1979 de l'Imperial Valley, Californie, à environ 1 km de la rupture. Il n'existe aucune preuve connue des auteurs qui suggèreraient des accélérations du sol supérieures à 1 g à une distance d'environ 25 km d'une rupture.

#### 4.3 Elaboration d'une méthode d'analyse des mouvements du sol

Pour développer une méthode d'analyse des mouvements sismiques du sol, on devrait idéalement sélectionner des accélérogrammes expérimentaux typiques des conditions mentionnées précédemment (magnitude et distance) d'un séisme conceptuel, et préparer des diagrammes d'évolution en fonction du temps des mouvements conceptuels du sol. Ces diagrammes d'évolution en fonction du temps pourraient aussi être utilisés dans l'établissement des paliers spectraux de réponse pour les intervalles de fréquence de résonance des installations critiques du terminal. Malheureusement, aucun enregistrement de mouvements forts dans l'Est du Canada typique des conditions du séisme conceptuel pour Gros Cacouna n'est disponible. On doit donc utiliser notre jugement pour essayer de simuler ces conditions en utilisant les enregistrements de mouvements forts disponibles (principalement de l'Ouest des E.U.).

Le plus important tremblement de terre de l'Ouest des E.U. pour lequel des accélérogrammes sont disponibles est le tremblement de terre de 1952 de Kern County pour lequel la magnitude était de 7.2 (Kanamori et

Jennings, 1978; Bolt, 1978). Les enregistrements de l'accélération horizontale et les diagrammes de vitesse horizontale (première intégrale de l'accélération) au site d'enregistrement le plus proche (43 km) sont montrés dans la figure 14. Nous emploierons ces enregistrements pour illustrer une méthode de simulation des mouvements sismiques du sol qui peuvent être considérés comme représentatifs de ceux que produirait à Gros Cacouna un tremblement de terre conceptuel initié dans la zone de Charlevoix.

Hasegawa et coll. (1981) ont montré que des valeurs soutenues de l'accélération et de la vitesse ont des coefficients pour la magnitude et pour la distance qui varient peu de ceux adoptés pour les mesures maximales des mouvements du sol tels que montrés par les équations (2) et (3) pour l'Est canadien. Nous emploierons donc ces coefficients pour étalonner l'ensemble des enregistrements de la figure 14. En résumé, les coefficients d'étalonnage sont les suivants:  $e^{1.3M}$  pour l'accélération maximale et  $e^{2.3M}$  pour la vitesse maximale dans les régions Ouest et Est,  $R^{-1.5}$  et  $R^{-1.1}$  respectivement pour l'accélération maximale dans les régions Ouest et Est,  $R^{-1.3}$  et  $R^{-1.0}$  respectivement pour la vitesse maximale dans les régions Ouest et Est. Les mouvements maximums du sol sont définis comme étant identiques à l'Ouest et à l'Est à une distance de 15 km d'un hypocentre nominal.

Le séisme de Kern County avait une profondeur focale d'environ 15 km et nous pouvons assigner une profondeur focale identique à un tremblement de terre conceptuel de Charlevoix. Ainsi, la distance hypocentrale pour les enregistrements de la figure 14 est d'environ 45 km; environ 30 km dans le cas de Gros Cacouna.

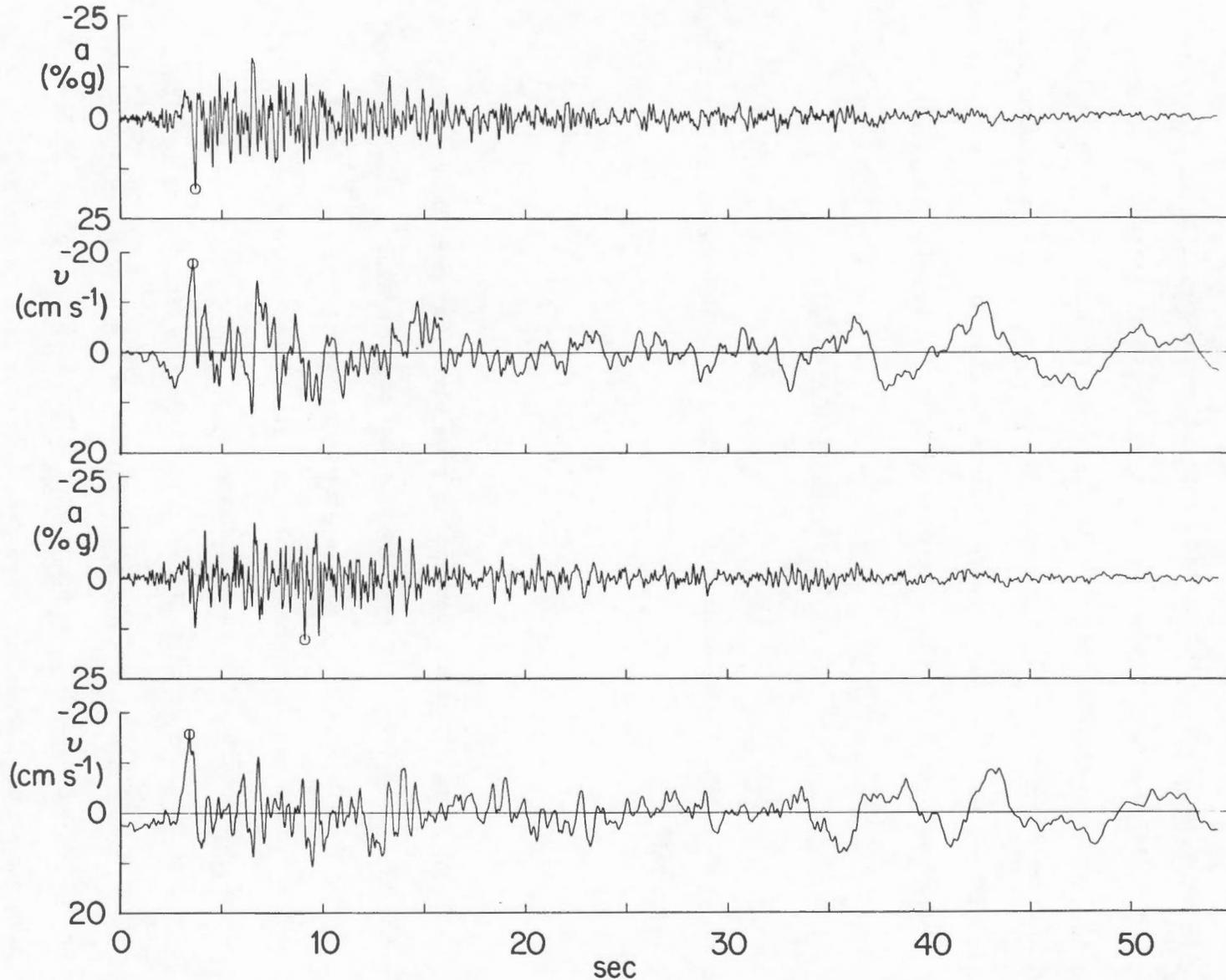


Figure 14. Enregistrements de l'accélération horizontale et diagrammes de vitesse (première intégrale de l'accélération), selon les directions S69E (courbes supérieures) et N21E (courbes inférieures), des mouvements forts du séisme de Kern County (Californie) qui s'est produit le 21 juillet 1952. Ces enregistrements ont été effectués au Taft Lincoln School Tunnel. Les mouvements maximums du sol (cercles) sont 18% g et 18 cm s<sup>-1</sup> selon la direction S69E et 15% g et 16 cm s<sup>-1</sup> selon la direction N21E. Adaptée du California Institute of Technology (1971).

Les effets des différentes distances ainsi que de l'atténuation en fonction de la distance peuvent être pris en compte en étalonnant les mouvements du sol du séisme de Kern County pour la distance nominale de 15 km en utilisant l'atténuation pour l'Ouest et ensuite en l'extrapolant à une distance hypocentrale de 30 km en utilisant l'atténuation pour l'Est. Les enregistrements de la figure 14 peuvent donc être étalonnés afin de représenter les mouvements du sol produits à Gros Cacouna pour un séisme de magnitude 7.2 issu de la zone de Charlevoix en multipliant les données de l'évolution de l'accélération en fonction du temps par

$$(15/45)^{-1.5} \times (30/15)^{-1.1} = 2.4,$$

et en multipliant les données de l'évolution de la vitesse en fonction du temps par

$$(15/45)^{-1.3} \times (30/15)^{-1.0} = 2.1$$

Les enregistrements peuvent de plus être étalonnés pour de plus grandes magnitudes. Par exemple pour une magnitude de 7.5, l'accélération serait multipliée par  $e^{1.3(0.3)}=1.5$  et la vitesse par  $e^{2.3(0.3)}=2.0$  donnant ainsi des facteurs globaux de multiplication respectifs de 3.6 et 4.2 pour l'accélération et la vitesse.

Les facteurs de multiplication de l'accélération et de la vitesse de 3.6 et 4.2 indiquent que les mouvements du sol à Gros Cacouna pour un séisme de magnitude 7.5 se produisant à Charlevoix seraient légèrement plus riches en énergie de basse fréquence que dans le cas des

enregistrements du séisme de Kern County montrés dans la figure 14. Cependant, il existe une incertitude supplémentaire du fait que nous ne possédons aucune méthode permettant de tenir compte des différentes fréquences dominantes de la source d'énergie d'un séisme de magnitude 7.5 se produisant sur le bouclier canadien comparée à celle d'un séisme de l'Ouest des E.U.

Il sera peut-être nécessaire de prendre en considération l'évolution de l'accélération en fonction du temps dans la conception d'installations possédant de hautes fréquences de résonance, et/ou l'évolution de la vitesse en fonction du temps pour des installations possédant des fréquences naturelles de l'ordre de 1 Hz. En appliquant le facteur multiplicatif de 3.6 aux deux accélérogrammes similaires de la figure 14, les mouvements conceptuels du sol pour Gros Cacouna auraient une évolution de l'accélération horizontale en fonction du temps possédant une accélération maximale située entre 55 et 65% g. Ils possèderaient une valeur soutenue (atteinte par à peu près les cinq plus importants cycles, en utilisant la définition de Hasegawa et coll. (1981)) de l'ordre de 35 à 45% g et une durée de l'ordre de 25 à 35 secondes avec des maxima dépassant 20% g. Multiplier les diagrammes de vitesse de la figure 14 par un facteur de 4.2 résulterait en une évolution de la vitesse horizontale en fonction du temps possédant une valeur maximale de l'ordre de 65 à 75 cm s<sup>-1</sup>. Des données représentatives de l'évolution des mouvements verticaux en fonction du temps seraient celles étalonnées aux 2/3 des mouvements horizontaux.

Un séisme plus petit, mais ayant produit un nombre important de données sur les mouvements forts dans sa proximité est le séisme de

magnitude 6.6 de l'Imperial Valley, Californie, s'étant produit en Octobre 1979 (Porcella et Matthiesen, 1979, Joyner et coll., 1981). Bien que la nature des mouvements de faille de ce séisme rende difficile son extrapolation à un tremblement de terre important sur le bouclier canadien nous utiliserons les données sur l'accélération maximale de Porcella et Matthiesen pour illustrer les réserves additionnelles que l'on doit faire au sujet des mouvements conceptuels du sol pour Gros Cacouna.

La figure 15 montre les accélérations horizontales maximales en fonction à la fois de la distance épacentrale et de la distance du point le plus proche de la faille. L'épicentre était situé à l'extrémité Sud d'une faille d'environ 40 km de longueur et la rupture s'est propagée du Sud vers le Nord. La plupart des accélérations maximales à des distances épacentrales, par exemple, de l'ordre de 25 km sur la figure 15b furent enregistrées à des distances de l'ordre de 1 à 10 km de la faille. Gros Cacouna n'est pas situé à moins de 25 km de la faille supposée d'un séisme de magnitude 7.5 de la zone de Charlevoix. Donc, la "distance par rapport à la faille" dans le cas de l'Imperial Valley (Figure 15a) est la meilleure analogie avec la distance épacentrale (ou hypocentrale) de Gros Cacouna par rapport à Charlevoix.

Pour des distances de l'ordre de 25 km dans la figure 15a, les accélérations maximales sont de l'ordre de 5 à 20% g avec une valeur moyenne, ou prévision, d'environ 10% g. L'étalonnage de la magnitude entre 6.6 et 7.5 demande un facteur de multiplication de  $e^{1.3(0.9)} = 3.2$  et l'étalonnage de l'atténuation en fonction de la distance afin de simuler les conditions de propagation dans l'Est demande un facteur de  $(15/25)^{-0.4} = 1.2$ , pour un facteur global de 3.8. L'étalonnage de la

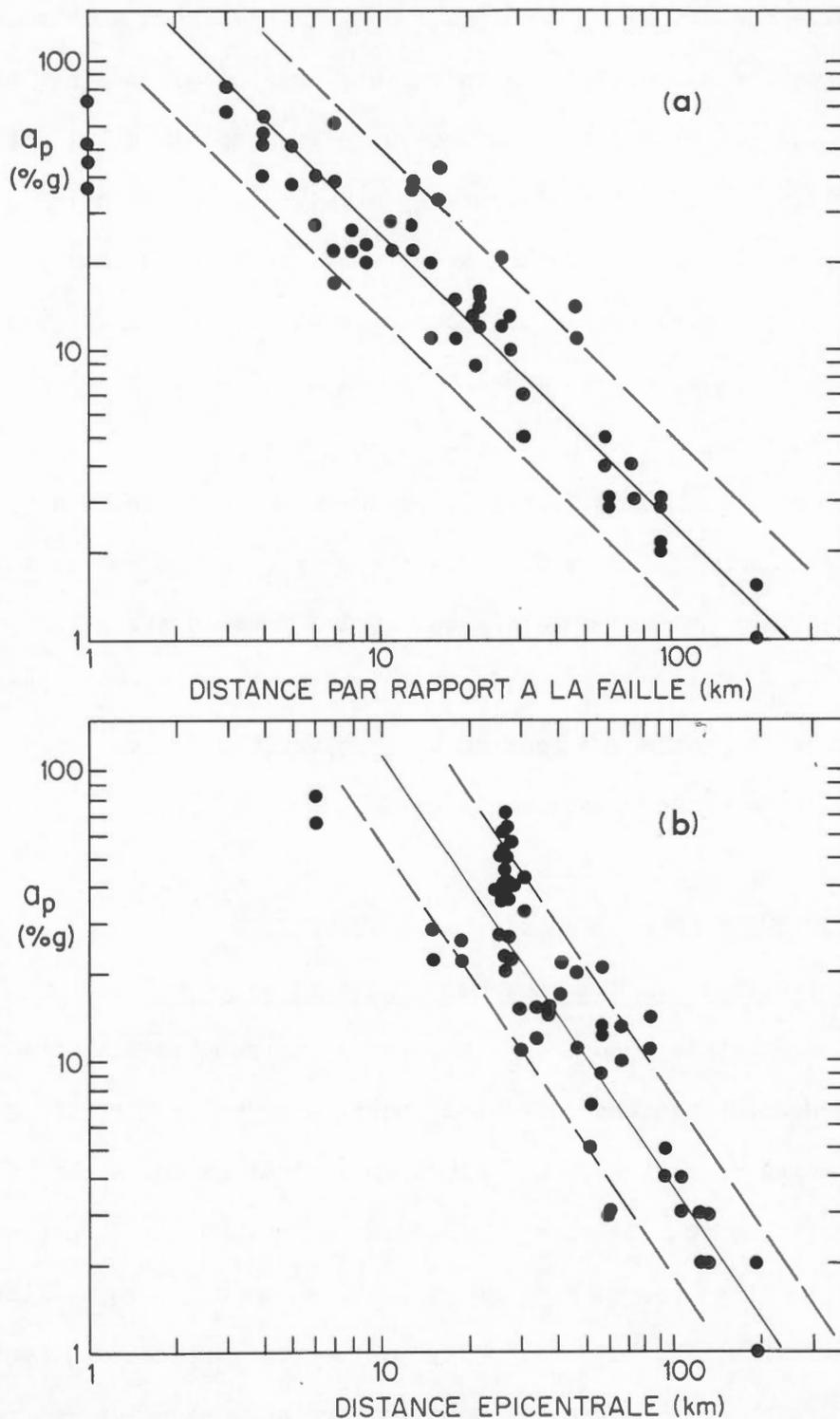


Figure 15. Accélérations horizontales maximales enregistrées lors du séisme de l'Imperial Valley (Californie) d'Octobre 1979 (Porcella et Matthiesen, 1979). Ces accélérations sont représentées (a) en fonction de la distance par rapport à la faille; et (b) en fonction de la distance épacentrale. Des droites à pente de 1.0 et 1.5 sont associées respectivement aux données (a) et (b). Les tirets représentent un facteur 2 au-dessus ou au-dessous de la droite moyenne.

valeur prévue conduit à une accélération maximale de 40% g dans le cas de Gros Cacouna; l'étalonnage de la valeur extrême produirait une valeur extrême de 75% g. Ainsi, les simulations effectuées en utilisant le séisme de l'Impérial Valley donnent des accélérations maximales quelques peu inférieures à celles obtenues avec le séisme de Kern County.

Cependant, ceci montre aussi que des accélérations maximales jusqu'à 75% g peuvent être obtenues en considérant le cas le plus mauvais à chaque étape de l'extrapolation, à savoir, la plus grande magnitude possible, la distance la plus courte de la faille postulée, et ensuite en adoptant pour les mouvements maximums du sol un écart type plus grand que la valeur prévue. Ceci est une accumulation de cas les plus défavorables que nous estimons bien au-delà du crédible, et nous acceptons les résultats de l'Imperial Valley comme une confirmation raisonnable des mouvements du sol estimés à l'aide des données du séisme de Kern County.

## 5. RISQUE SEISMIQUE A MELFORD POINT, NOUVELLE-ECOSSE

### 5.1 Etude probabiliste des mouvements séismiques du sol

Melford Point se trouve dans une vaste région possédant des mouvements du sol d'intensité relativement basse entre 5 et 10% g et 5 et 10  $\text{cm s}^{-1}$  (figures 8 et 9). Un calcul de l'accélération et de la vitesse maximales pour le site de coordonnées 45.5°N, 61.25°O est montré à la figure 16. (Ces coordonnées approximatives sont celles utilisées par Fenco Consultants Ltd. (1980b). Elles situent l'emplacement à environ 10 km au Sud-Est du site proposé pour le terminal, site qui est montré dans le même rapport; une différence mineure qui n'aura aucune influence sur l'estimation du risque séismique qui suit.)

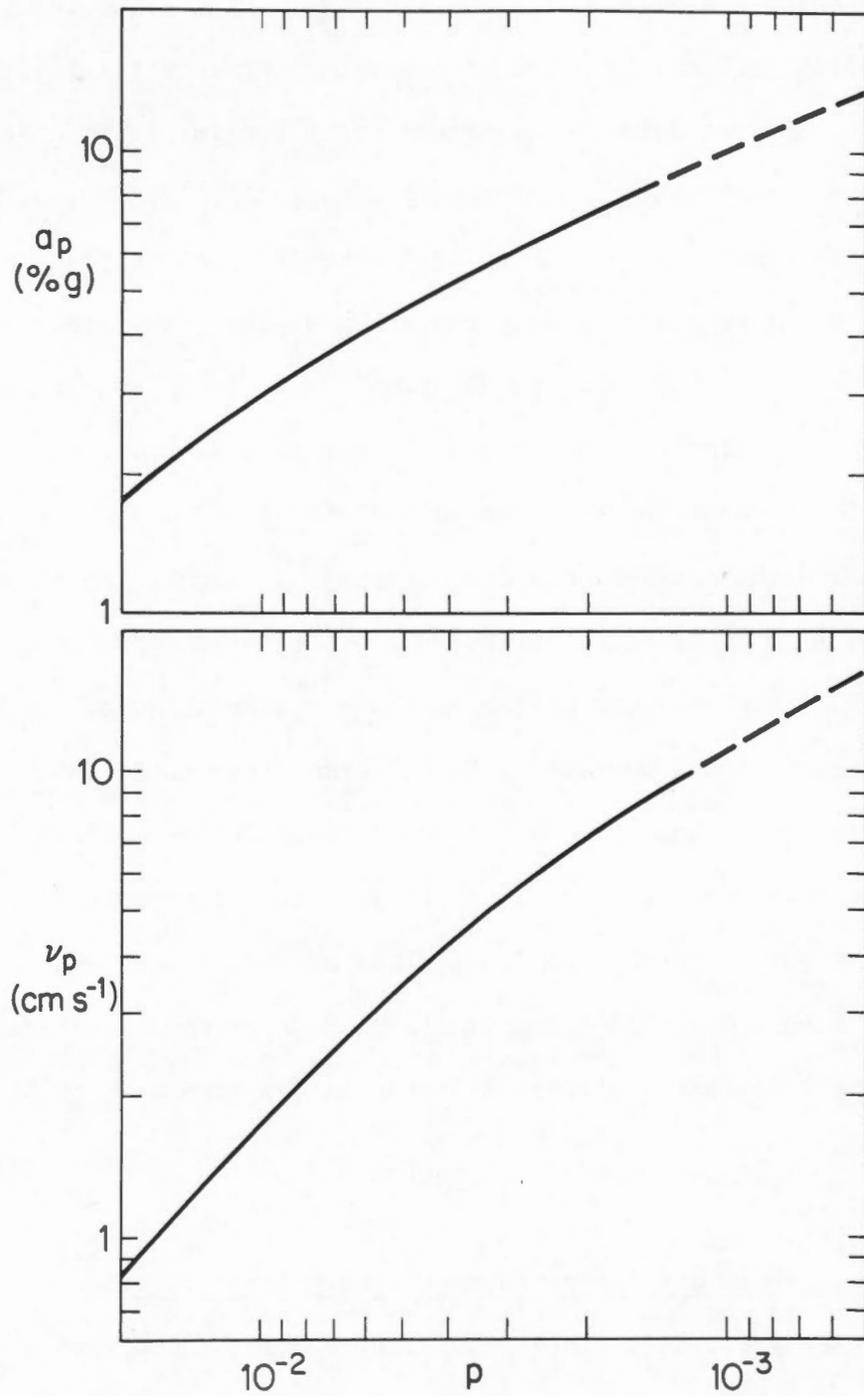


Figure 16. Accélération ( $a_p$ , diagramme supérieur) et vitesse ( $v_p$ , diagramme inférieur) horizontales maximales en fonction de la probabilité de dépassement ( $p$ ) pour Melford Point (emplacement nominal  $45.5^{\circ}\text{N}, 61.25^{\circ}\text{O}$ ).

Les arguments développés plus haut sur la stabilité des mouvements du sol à faible probabilité à Gros Cacouna sont également applicables ici. Cependant, Melford Point ne se trouve pas à proximité immédiate d'une zone de séismes importants, ainsi les équations (2) et (3) peuvent être considérées comme fournissant de meilleures évaluations des mouvements maximum du sol pour des séismes régionaux et les résultats sont considérés comme des estimations valables du risque jusqu'à une probabilité d'environ  $10^{-3}$  par an. Néanmoins, si la charge sismique dans cette région à faible risque devait régir quelques aspects de la conception du terminal (possibilité qui est inconnue des auteurs), il serait important d'établir les caractéristiques principales des mouvements conceptuels du sol. La section suivante essaiera d'établir ces caractéristiques.

Les limites des mouvements du sol à la probabilité de 10% de dépassement en 50 ans (figure 17) seront appropriées à l'élaboration des spectres de réponse lors de la conception afin de permettre la poursuite des opérations du terminal. Des limites similaires des mouvements du sol ayant un niveau d'accélération de 10% g et un niveau de vitesse de  $11 \text{ cm s}^{-1}$  seraient également appropriées pour le bas niveau de probabilité de  $10^{-3}$  par an.

## 5.2 Etude déterministe des mouvements sismiques du sol

Une analyse déterministe pour Melford Point a pour but essentiel de déterminer quel genre de séisme typique serait à l'origine du risque afin de caractériser les mouvements du sol dont les effets sur certaines installations pourraient entraîner la fermeture sans danger du terminal. La première chose à savoir est, quelles sont les zones sismiques qui constituent les principales composantes du risque.

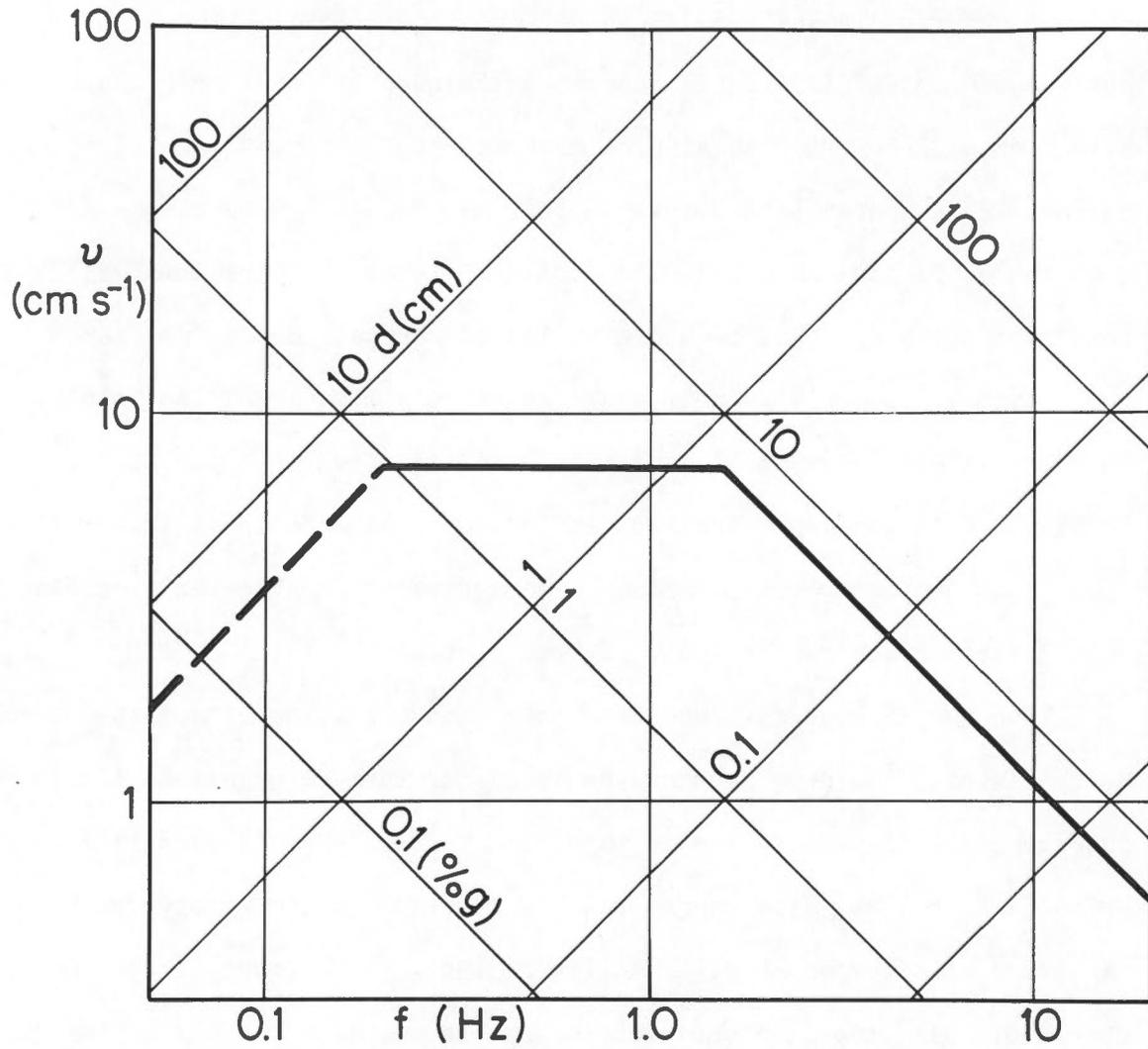


Figure 17. Limites maximales des mouvements du sol à Melford Point à la probabilité de dépassement de 10% en 50 ans devant être utilisées dans l'élaboration des spectres de réponse.

Le programme d'analyse du risque fourni de l'information sur les contributions des différentes sources sismiques du modèle régional à un site particulier. Pour le site de Melford Point, pour une accélération maximale à la probabilité d'environ  $10^{-3}$  par année, 87% du risque provient de la zone du Grand Banc, 10% de la zone de Charlevoix, 2% de la zone résiduelle de l'Est canadien et les 1% restants des autres zones (voir figure 7 pour la géométrie des zones relatives à Melford Point). Pour une vitesse maximale à la probabilité d'environ  $10^{-3}$  par année, 82% provient de la zone du Grand Banc et 18% de la zone de Charlevoix. Il est donc clair que les zones possédant les magnitudes limites les plus élevées sont les zones dominantes (voir figures 7 et 13).

Bien que la zone du Grand Banc soit beaucoup moins connue que la zone de Charlevoix, les deux se sont vues assigner la même magnitude limite supérieure (7.5). Un séisme de magnitude 7 s'est produit dans la zone du Grand Banc en 1929, mais en général, la relation de récurrence de la magnitude est pauvrement définie (figure 13b). Comme pour la zone de Charlevoix discutée dans une section antérieure, il n'est pas estimé que la zone du Grand Banc expérimentera un séisme approchant la magnitude 8, magnitude typique des zones de forte interaction entre les plaques.

Le point de la zone du Grand Banc le plus proche de Melford Point (tel que défini à la figure 7) se situe à environ 270 km. Un séisme de magnitude 7.5 (choisi sur la base des similitudes assumées avec la zone de Charlevoix) se produisant à cet endroit produirait à Melford Point une accélération maximale d'environ 13% g et une vitesse maximale d'environ  $20 \text{ cm s}^{-1}$ . Ainsi les mouvements du sol à la probabilité de  $10^{-3}$  par année sont similaires en ce qui concerne l'accélération et deux fois plus

faible en ce qui concerne la vitesse que le "maximum crédible" qui serait produit par la zone de risque dominante.

(Il est à noter que l'amplitude des mouvements du sol continue de croître lorsque la probabilité décroît (figures 11 et 16), bien que les contributions à proximité de la magnitude limite soient prédominantes. Il en est ainsi à cause du terme stochastique des relations d'atténuation des mouvements du sol utilisées dans l'analyse du risque. A de faibles probabilités, la plupart des contributions continuent de provenir des termes de faible probabilité de la distribution stochastique, une situation à laquelle on doit associer un large degré d'incertitude).

La zone de Charlevoix qui constitue la seconde plus importante contribution au risque à Melford Point est située à environ 700 km et sera majoritairement une source de mouvements du sol de basse fréquence. De tels mouvements du sol sont adéquatement représentés par un séisme conceptuel du Grand Banc, séisme qui produirait également de relativement basses fréquences. En fait, à cause des grandes distances impliquées, l'accélération maximale probabiliste est peut-être une surestimation des mouvements du sol à utiliser dans la conception pour des fréquences plus hautes, de l'ordre de 2 à 10 Hz. Les contributions importantes pour ce qui est des plus hautes fréquences proviendraient de séismes proches, dans le cas de Melford Point, de séismes se produisant dans la zone résiduelle de l'Est canadien.

La zone résiduelle de l'Est canadien est une vaste région où la sismicité de faible magnitude est dispersée. Ses limites (figure 7) sont dessinées afin d'inclure approximativement les régions qui ont expérimenté de faibles niveaux de sismicité historique et récente (voir aussi

figure 2). Sa contribution aux mouvements du sol montrés dans les figures 8 et 9 est négligeable. Néanmoins Melford Point se situe dans cette zone et on doit pour le moins se poser la question de faibles, mais peut-être significatifs séismes se produisant près du site.

En assumant, comme nous l'avons fait pour les estimations probabilistes du risque, que les tremblements de terre se produisent au hasard à l'intérieur de la zone, la relation de récurrence de la magnitude (figure 13d) peut être normalisée pour différentes régions autour de Melford Point. La superficie de la zone résiduelle de l'Est canadien est  $2.7 \times 10^6 \text{ km}^2$ ; le taux cumulatif de tremblements de terre de magnitude 4.5 est d'environ 0.04 par an. Sur ces bases, un séisme de magnitude 4.5 ou supérieure a une probabilité annuelle de se produire à l'intérieur d'un rayon de 100 km autour de Melford Point de  $5 \times 10^{-4}$ . Nous pensons qu'un tel événement n'a pas besoin d'être considéré comme ayant une contribution significative aux mouvements conceptuels du sol pour Melford Point.

La seule autre zone pertinente, même si elle ne contribue pas au risque probabiliste est la zone des Appalaches du Nord dont la plus proche limite (voir figure 7) est à environ 250 km de Melford Point. La limite Est de cette zone fut choisie à cause du fait que la fréquence des séismes au Nouveau-Brunswick est plus grande que celles plus à l'Est au Nouvelle-Ecosse, Ile du Prince Edouard ou Golfe du Saint-Laurent. Une magnitude limite supérieure de 6 fut choisie pour la zone des Appalaches du Nord (voir figure 13c) du fait que l'événement historique le plus important de cette zone possédait une magnitude d'environ 5.5.

Un séisme de magnitude 6 dans la zone des Appalaches du Nord produirait au premier abord  $2\%$  g et  $0.7 \text{ cm s}^{-1}$  à Melford Point. L'extrapolation de la portion droite de la figure 13c à des magnitudes

plus importantes, c'est-à-dire assumer que la limite supérieure choisie est incorrecte, suggérerait pour des séismes importants des fréquences plus basses que pour la zone du Grand Banc qui se trouve à des distances similaires. Donc, la zone des Appalaches du Nord n'est pas considérée comme apportant une contribution significative aux mouvements conceptuels du sol pour Melford Point.

En résumé, les mouvements horizontaux du sol à prendre en considération dans la conception de Melford Point peuvent être représentés par une évolution des mouvements en fonction du temps indiquant des fréquences relativement basses avec une accélération maximale ne dépassant pas 13% g. Les limites supérieures des mouvements du sol à utiliser pour l'élaboration des spectres de réponse et qui peuvent être considérés comme les "maximums crédibles" pour ce site auront une valeur de l'accélération d'environ 13% g et une valeur de la vitesse d'environ 20 cm s<sup>-1</sup>. Les paramètres des mouvements verticaux du sol à prendre en considération seraient aux 2/3 de ces valeurs.

## 6. CONCLUSION

Les cartes probabilistes d'accélération et de vitesse maximales préparées par la DPG pour l'Est du Canada fournissent un cadre régional et un point de départ pour l'évaluation du risque sismique à Gros Cacouna et à Melford Point. Cependant, il est démontré ci-dessus que de telles cartes et en général, la méthode probabiliste ne fournissent pas suffisamment d'informations pour la détermination des mouvements du sol à prendre en considération dans la conception des installations critiques d'un terminal de regazéification du GNL. Nous avons donc fait appel à l'information

séismologique et géologique disponibles pour illustrer des méthodes d'études des caractéristiques des mouvements conceptuels du sol, caractéristiques qui satisfont de fait aux normes de l'ACNOR pour des installations de GNL.

Les conditions requises pour l'évaluation du risque séismique à ces deux sites sont très différentes parce que Gros Cacouna se trouve à proximité de la zone séismique la plus active de l'Est canadien alors que Melford Point se trouve dans une région de très faible séismicité historique ou récente et n'est affectée que par des zones séismiques distantes. Ces différences régissent l'analyse des données disponibles; mais pour les deux emplacements une grande part de jugement est nécessaire pour estimer les mouvements conceptuels du sol qui seraient produits par d'importants séismes, séismes toujours possibles, alors qu'il n'existe à l'heure actuelle aucune donnée expérimentale appropriée des forts mouvements du sol pour l'Est de l'Amérique du Nord.

Les mouvements du sol à prendre en considération dans la conception d'installations critiques et qui dans la publication Z276 de l'ACNOR sont regroupés sous l'appellation "Safe Shutdown Earthquake" ont été étudiés pour Gros Cacouna sous la forme d'évolutions représentatives des mouvements horizontaux en fonction du temps. Ces mouvements du sol auraient une accélération maximale d'environ 60% g, un niveau soutenu d'environ 40% pendant à peu près 5 cycles et une durée d'environ 30 secondes avec des maxima dépassant 20% g. Si nécessaire pour la conception, une évolution de la vitesse en fonction du temps serait similaire aux enregistrements de vitesse de la figure 14, mais étalonnée à une vitesse maximum d'environ  $70 \text{ cm s}^{-1}$ . Les spectres de réponse à utiliser dans la conception seraient ceux qui sont représentatifs des spectres de réponse calculés à partir de l'évolution des

mouvements du sol adoptée. Pour le site de Melford Point, les mouvements du sol auraient une accélération maximale d'environ 13% g. La durée des mouvements significatifs est difficile à estimer, mais à cause de la grande distance qui le sépare de la zone dominante, elle pourrait être supérieure à celle pour Gros Cacouna mais avec des amplitudes plus faibles. Si une évolution spécifique des mouvements du sol en fonction du temps n'était pas développée, les limites des mouvements du sol pour l'étude des spectres de réponse seraient établies à 13% g et  $20 \text{ cm s}^{-1}$ . L'évolution en fonction du temps ou les limites des mouvements verticaux du sol seraient établies aux 2/3 de ces niveaux. Ainsi, en considérant les niveaux relatifs des mouvements conceptuels du sol, le risque sismique à Gros Cacouna est à peu près 5 fois plus grand qu'à Melford Point.

La publication Z276 de l'ACNOR spécifie aussi un "Operating Base Earthquake". Nous pensons que les estimations probabilistes fournies par les cartes de risque de la DPG à la probabilité de dépassement de 10% par 50 années est adéquate pour cette étude. Ainsi, les mouvements du sol à prendre en considération pour la conception dans le cas d'un tremblement de terre dont les effets à Gros Cacouna permettront la poursuite des opérations du terminal auront respectivement une accélération et une vitesse maximales d'environ 40% g et  $25 \text{ cm s}^{-1}$ ; à Melford Point, les valeurs respectives seront d'environ 7% g et  $7 \text{ cm s}^{-1}$ . Les limites des mouvements du sol pour l'étude des spectres de réponse lors de la conception afin de permettre la poursuite des opérations du terminal ont été illustrées plus haut aux figures 11 et 17.

Ces estimations n'ont pris en considération aucune des conditions insolites qui pourraient être rencontrées aux sites de Gros Cacouna et de Melford Point, conditions qui demanderaient une mise à jour des mouvements du

sol avant d'utiliser ceux-ci dans la conception. De plus, cette étude a été faite sans connaître les fréquences de résonance dominantes pour les installations critiques d'un terminal de GNL; une étude plus poussée des mouvements du sol à utiliser dans la conception pourrait être requise, particulièrement si ce sont de très basses fréquences. Toute utilisation des résultats présentés ici devra prendre ces facteurs en considération.

#### REMERCIEMENTS

Nous sommes reconnaissant aux Drs. M.J. Berry et H.S. Hasegawa pour l'aide qu'ils nous ont apporté au cours de la préparation de ce rapport.

BIBLIOGRAPHIE

- Anglin, F.M., et G. Buchbinder (1981). Microseismicity in the mid-St. Lawrence Valley Charlevoix Zone, Quebec. Bull. Seism. Soc. Am. 71. 1553-1560.
- Association canadienne de normalisation (1981a). Liquefied natural gas (LNG)-production storage and handling. CSA standard Z276-M1981, Association canadienne de normalisation, Rexdale, Ontario.
- Association canadienne de normalisation (1981b). Design procedures for seismic qualification of CANDU nuclear power plants. CSA Standard CAN3-N289.3M, Association canadienne de normalisation, Rexdale, Ontario.
- Basham, P.W., D.H. Weichert et M.J. Berry (1979). Regional Assessment of seismic risk in eastern Canada. Bull. Seism. Soc. Am. 69, 1567-1602.
- Basham, P.W., D.H. Weichert, F.M. Anglin, M.J. Berry, et W.G. Milne (1982). New probabilistic strong seismic ground motion maps of Canada: a compilation of earthquake source zones, methods and results. Dossier public de la Direction de la physique du globe (en préparation).
- Bolt, B.A. (1978). The local magnitude  $M_L$  of the Kern County earthquake of July 21, 1952. Bull. Seism. Soc. Am., 68, 513-515.
- California Institute of Technology (1971). Strong motion earthquake accelerograms - digitized and plotted data: Vol. II - corrected accelerograms and integrated ground velocity and displacement curves. Earthquake Engineering Research Laboratory, EERL 71-50, Pasadena, California.
- Conseil national de recherches (1980a). Code national du bâtiment du Canada 1980. Comité associé du Code national du bâtiment, CNRC No. 17303F, Conseil national de recherches, Ottawa.
- Conseil national de recherches (1980b). Supplément du Code national du bâtiment du Canada 1980. Comité associé du Code national du bâtiment, CNRC No. 17724F, Conseil national de recherches, Ottawa.
- Cornell, C.A. (1968). Engineering seismic risk analysis. Bull. Seism. Soc. Am. 58, 1583-1606.
- Fenco Consultants Ltd. (1980a). LNG receiving terminal, seismic risk and local faults, Gros Cacouna, Quebec. Fenco Consultants Ltd., Toronto.
- Fenco Consultants Ltd. (1980b). LNG receiving terminal, seismic risk and local faults, Melford Point, Nova Scotia. Fenco Consultants Ltd., Toronto.
- Fenco Consultants Ltd. (1981a). LNG receiving terminal, seismic risk-Addendum 1, Melford Point, Nova Scotia. Fenco Consultants Ltd., Toronto.

- Fenco Consultants Ltd. (1981b). LNG receiving terminal, seismic risk-Addenbum 2, Gros Cacouna, Quebec. Fenco Consultants Ltd., Toronto.
- Hasegawa, H.S., et J. Adams (1981). Crustal stresses and seismotectonics in eastern Canada. Dossier public de la Direction de la physique du globe No. 81-12, 42 pp.
- Hasegawa, H.S., et R.J. Wetmiller (1980). The Charlevoix earthquake of 19 August 1979 and its seismo-tectonic environment. Earthquake Notes, 51, 23-37.
- Hasegawa, H.S., P.W. Basham et M.J. Berry (1981). Attenuation relations for strong seismic ground motion in Canada. Bull. Seism. Soc. Am., 71, 1943-1962.
- Heidebrecht, A.C., P.W. Basham, J.H. Rainer et M.J. Berry (1982). Engineering applications of new probabilistic seismic ground motion maps of Canada. (en préparation).
- Joyner, W.B., D.M. Boore et R.L. Porcella (1981). Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake. U.S. Geol. Survey, Open-File Report 81-365, 46 pp.
- Kanamori, H., et D.L. Anderson (1975). Theoretical basis of some empirical relations in seismology. Bull. Seism. Soc. Am., 65, 1073-1095.
- Kanamori, H., et P.C. Jennings (1978). Determination of local magnitude,  $M_L$ , from strong-motion accelerograms. Bull. Seism. Soc. Am., 68, 471-485.
- King, L.H., et B. MacLean (1970). Continuous seismic-reflection study of Orpheus gravity anomaly. Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol., 54, 2007-2031.
- King, L.H., et B. MacLean (1976). Geology of the Scotian Shelf and adjacent areas, CGC étude 74-31, incluant CGC carte 812 H, Commission géologique du Canada, Ottawa, Canada.
- King, L.H., B. MacLean, G.A. Bartlett, J.A. Jeletsky et W.S. Hopkins (1970). Cretaceous strata on the Scotian Shelf. J. Can. Sci. Terre, 7, 145-155.
- Kumarapeli, P.S., et V.A. Saull (1966). The St. Lawrence Valley system: A North American equivalent of the East African rift valley system. J. Can. Sci. Terre, 3, 639-658.
- Leblanc, G., et G. Buchbinder (1977). Second microearthquake survey of the St. Lawrence Valley near La Malbaie, Quebec. J. Can. Sci. Terre, 14, 2778-2789.
- McGuire, R.K. (1976). FORTRAN computer program for seismic risk analysis. U.S. Geological Survey Open File Report 76-67, 90 pp.

- Milne, W.G., et A.G. Davenport (1969). Distribution of earthquake risk in Canada. Bull. Seism. Soc. Am., 59, 729-754.
- Moore, H.D. (1979). Mapping and classification of structural linears in Laurentide Park area of Quebec based on Landsat images. Dossier public de la Direction de la physique du globe No. 79-19, 16 pp.
- Page, R.A., et P.W. Basham (1982). Earthquakes and their effects at offshore sites. In: The Offshore Environment and Petroleum Development (P.G. Teleki and L.E. Garrison, Eds.), Marcel Dekker Inc., New York (en préparation).
- Porcella, R.L., et R.B. Matthiesen (1979). Preliminary summary of the U.S. Geological Survey strong-motion records from the October 15, 1979 Imperial Valley earthquake. U.S. Geol. Survey, Open-File Report 79-1654, 41 pp.
- Rondot, J. (1979a). Astroblème de Charlevoix, Anorthosite de Saint-Urbain et Stratigraphie. Guide d'excursion A8 et B8. Université Laval, Québec.
- Rondot, J. (1979b). Reconnaissances géologiques dans Charlevoix-Saguenay. Ministère des Richesses naturelles du Québec, DPV-682, 44 pp.
- Sanford, B.V., A.C. Grant, J.A. Wade et M.S. Barss (1979). Geology of Eastern Canada and adjacent areas, CGC carte 1401 A, Commission géologique du Canada, Energie, Mines et Ressources, Ottawa, Canada.
- Smith, W.E.T. (1962). Earthquakes of eastern Canada and adjacent areas: 1534-1927. Pub. Obs. Fed., 26, 271-301.
- Stevens, A.E. (1980). Re-examination of some larger La Malbaie, Quebec, earthquakes (1924-1978). Bull. Seism. Soc. Am., 70, 529-557.
- Street, R.L., et F.T. Turcotte (1977). A study of northeastern North American spectral moments, magnitudes and intensities. Bull. Seism. Soc. Am., 67, 599-614.
- Trifunac, M.D. (1976). Preliminary analysis of the peaks of strong earthquake ground motion-dependence of peaks on earthquake magnitude, epicentral distance, and recording site conditions. Bull. Seism. Soc. Am., 66, 189-219.
- Weichert, D.H. (1980). Estimation of the earthquake recurrence parameters for unequal observation periods for different magnitudes. Bull. Seism. Soc. Am., 70, 1337-1346.
- Weichert, D.H., et W.G. Milne (1979). On Canadian methodologies of probabilistic seismic risk estimation. Bull. Seism. Soc. Am., 69, 1549-1566.
- Whitham, K., W.G. Milne et W.E.T. Smith (1970). The new seismic zoning map for Canada 1970. Can. Underwriter, 15, 6.