

Impact of deglaciation on present-day intraplate seismicity in eastern North America and western Europe

Mark D. Zoback*, Balz Grollimund

Department of Geophysics, Stanford University, Stanford, CA 94305, USA

Received 15 January 2001; accepted 18 January 2001

Abstract – The retreat of major ice sheets in North America and northern Europe caused a large-scale isostatic disequilibrium of the lithosphere–asthenosphere system. As a result, formerly glaciated areas started to uplift and lithospheric bending occurred, especially near ice margins. While it is well known that post-glacial uplift continues until present-day in formerly glaciated areas, so has the associated flexure of the lithosphere. This continues to alter the stress state in the areas surrounding the former ice sheet. We have addressed the question of the impact of deglaciation on intraplate stress and seismicity in two separate studies. In one study, we have mapped out and modeled the stress field in the Norwegian sector of the Northern North Sea, a prominent hydrocarbon region in the vicinity of the edge of ice sheet that covered Fennoscandia until $\sim 20\,000$ years ago. In the other study, we investigated the influence of lithospheric flexure as the possible cause of the anomalously high seismicity in the New Madrid Seismic Zone in the central United States. This was the site of three extremely large ($M \sim 8$) earthquakes in 1811–1812, following several previous large earthquakes in Holocene time. As there is no significant deformation of Tertiary sediments in the area, deglaciation appears to have been a trigger for recent seismicity.
© 2001 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

earthquakes / glaciation / deglaciation / lithosphere / modeling / stress

Résumé – Impact de la déglaciation sur la sismicité intra-plaque actuelle dans l'Est de l'Amérique du Nord et en Europe occidentale. Le retrait des calottes glaciaires en Amérique du Nord et en Europe septentrionale a induit un vaste déséquilibre isostatique dans le système lithosphère–asthénosphère. Les régions auparavant couvertes par les glaces se sont soulevées et un bombement isostatique s'est développé ; ces deux phénomènes se poursuivent actuellement. Il en résulte une modification de l'état de contrainte dans les régions entourant l'ancienne calotte glaciaire. Nous abordons le problème de l'impact de cette déglaciation sur les contraintes intraplaques et sur l'activité sismique dans deux régions typiques. D'une part, nous cartographions et modélisons le champ de contrainte dans le secteur norvégien de la mer du Nord septentrionale. Cette région pétrolifère est située près du bord de la calotte glaciaire qui recouvrait la Fennoscandinavie jusqu'à il y a environ 20 000 ans. D'autre part, nous voyons dans l'influence de la flexure lithosphérique une cause possible de la sismicité anormalement élevée dans la zone sismique de New Madrid, près du Centre des États-Unis. Cette zone a connu trois séismes extrêmement importants ($M \sim 8$) en 1811–1812, à la suite d'autres grands séismes survenus durant l'Holocène. Comme les sédiments tertiaires ne montrent pas de déformation significative dans ce secteur, la déglaciation constitue le facteur déclenchant le plus vraisemblable pour cette sismicité récente.
© 2001 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

séismes / glaciation / déglaciation / lithosphère / modélisation / contraintes

* Correspondence and reprints.

Version abrégée

1. Introduction

On sait que les marges continentales passives des hautes latitudes sont fréquemment associées à une sismicité anormalement élevée. En témoignent notamment les cas de la marge passive de l'Est du Canada [13, 23] et de la marge norvégienne [3]. Suivant un modèle proposé par Stein et al. [23], cet excès de sismicité est dû aux contraintes flexurales engendrées par le retrait des calottes glaciaires. Mais, alors que la tectonique des plaques fournit un cadre conceptuel d'ensemble à l'analyse des séismes le long des frontières actives dans le monde et à leur voisinage, les phénomènes géologiques qui gouvernent la sismicité intra-plaque demeurent insuffisamment compris. Or, l'influence de la fusion des glaces permet de comprendre pourquoi une excessive sismicité des marges passives demeure cantonnée aux hautes latitudes. La *figure 1* illustre la distribution de la sismicité intra-plaque dans l'Est de l'Amérique du Nord et en Europe nord-occidentale, distribution qui coïncide généralement avec l'extension maximale des glaces pendant le dernier épisode glaciaire, il y a ~ 20 000 ans environ.

Dans la plupart des modèles de «rebond glaciaire», la lithosphère est purement élastique, ce qui revient à rejeter l'éventualité d'une déformation intra-lithosphérique de type visqueux. C'est une approximation satisfaisante si l'on veut reproduire le rebond post-glaciaire, car le soulèvement à modéliser est principalement contrôlé par des rhéologies infra-lithosphériques. Klemann et Wolf [15] suggèrent toutefois que le comportement visqueux au sein de la lithosphère pourrait constituer un facteur crucial dans la modélisation des variations d'état de contrainte associées au rebond post-glaciaire. Les résultats de nos modélisations montrent que les contraintes observées ne peuvent être expliquées que si la lithosphère inférieure subit une déformation visqueuse permanente pendant la durée d'existence de la calotte glaciaire.

Afin d'analyser l'effet d'une charge glaciaire, nous avons fait appel à des modèles d'éléments finis tri-dimensionnels, avec des configurations géométriques réalistes pour les calottes glaciaires et des rhéologies vraisemblables pour la lithosphère. Cette modélisation vise à reconstituer les variations de contrainte au voisinage de l'ancien front glaciaire. Les variations locales de contrainte sont probablement insensibles aux variations de la viscosité à grande profondeur; le comportement rhéologique aux profondeurs moindres joue un rôle plus important. Nous avons, de ce fait, adopté dans nos modèles une organisation relativement simple des ensembles sous-lithosphériques, concentrant nos efforts sur la configuration détaillée des rhéologies lithosphériques. Le bon accord entre les résultats de cette modélisation et l'observation, à la fois pour les contraintes et pour le soulèvement, nous indique que cette approche est appropriée. Par souci de concision, les résultats en termes de soulèvement ne seront pas exposés.

Pour éprouver de façon rigoureuse l'influence supposée du retrait glaciaire sur la sismicité des marges passives, la connaissance du champ de contrainte in situ, en termes d'orientations, de grandeurs et de variations latérales, joue un rôle essentiel. La marge de Norvège est à cet égard un «laboratoire naturel» parfait, car les forages pétroliers en mer ont permis d'accumuler un vaste ensemble de données de contraintes in situ. Dans la région sismique de New Madrid aux États-Unis, nous avons modélisé l'interaction entre les forces agissant à l'échelle des plaques, la structure lithosphérique et les contraintes qu'a induites la voussure de la lithosphère, accompagnant la mise en charge glaciaire et la déglaciation qui ont affecté le Centre de l'Amérique du Nord.

2. Déglaciation, contraintes in situ et séismes en mer du Nord septentrionale

Les modèles de rebond post-glaciaire sont contraints par les données relatives au soulèvement et au basculement des lignes de paléo-rivages. L'épaisseur lithosphérique ($T_{\text{lithosphère}}$) suggérée pour la Fennoscandinavie par de tels modèles varie considérablement: 120 km pour McConnell [18], 70 km pour Cathles [4] et pour Anundsen et Fjeldskaar [1]. La valeur de 110 km est adoptée par Wolf [27] en fonction d'un modèle d'équilibre et, par conséquent, représente une limite supérieure. L'estimation de Lambeck et al. [16], entre 100 et 150 km, dépasse de loin celle de 40 km environ [5]. Plus récemment, Fjeldskaar indique pour $T_{\text{lithosphère}}$ une valeur entre 20 et 50 km [6]. Une discussion plus détaillée de ce problème est publiée par Wolf [28]. On doit conclure que cette épaisseur lithosphérique est mal contrainte, les évaluations dépendant largement des données utilisées pour l'ajustement des modèles. Les variations latérales de cette épaisseur ont d'ailleurs accru les divergences. D'après Breuer et Wolf [2], de telles variations latérales sont présentes près du Spitzberg. Pour Spitsbergen et Fjeldskaar [6], l'épaisseur lithosphérique décroît du centre de la Fennoscandinavie vers la Norvège occidentale. À la suite de Fjeldskaar et Cathles [5], nous adoptons une épaisseur d'environ 50 km.

Au sud de la marge norvégienne, en Europe du Nord-Ouest, l'orientation de la contrainte horizontale maximum ($S_{H_{\text{max}}}$) est cohérente, NW-SE à NNW-SSE [21], le régime de contrainte étant en général de type décrochant ($S_v > S_{H_{\text{max}}} > S_{H_{\text{min}}}$). Les modèles géodynamiques montrent que cette orientation homogène de $S_{H_{\text{max}}}$ découle de l'interaction entre l'expansion océanique de la ride Médio-Atlantique et la collision Eurasie-Afrique [10]. Toutefois, dans le domaine de la mer du Nord septentrionale, des données précises d'orientation des contraintes, d'après la fracturation apparue lors des forages, soulignent un changement de direction de $S_{H_{\text{max}}}$ au voisinage du bord de l'ancienne calotte glaciaire, cette direction différant de celle de la dérive de la plaque observée plus au sud. Nous en déduisons que ce changement de direction est une conséquence de la flexure lithosphérique induite par la déglaciation. Ainsi que le montre la *figure 2*, $S_{H_{\text{max}}}$ est presque

est-ouest vers 61°N–3°E, dans la région étudiée en priorité.

De surcroît, la détermination des valeurs des contraintes révèle d'importantes variations sur des distances relativement modestes. Le passage de valeurs importantes de S_{Hmax} à des valeurs faibles, en direction de la côte de Norvège, est souligné par la nature des mécanismes au foyer des séismes, de type inverse loin de la côte mais de type décrochant, voire normal, plus près de celle-ci (figure 2). Stein et al. [23] et Walcott [25] ont démontré que de telles variations sont la conséquence des contraintes flexurales induites par la déglaciation. Nous nous proposons donc de vérifier si la présence de sismicité et la variation des contraintes, en réponse à la présence de fortes contraintes horizontales au large de la Norvège, résulte bien de la courbure lithosphérique induite par la décharge post-glaciaire et de la flexure lithosphérique qui lui est liée.

Les résultats de notre modélisation tri-dimensionnelle sont résumés sur la figure 3, concernant la mer du Nord, au large de la Norvège. Les contraintes induites par la flexure lithosphérique expliquent fort bien, à la fois l'orientation générale est-ouest des contraintes observée en mer du Nord septentrionale et le changement de la direction S_{Hmax} , qui passe de WNW–ESE, en bordure occidentale du *Viking Graben*, à ENE–WSW à l'est de ce fossé (figure 3a). Les données de magnitude des contraintes fournies par l'analyse d'environ 400 puits au large de la Norvège [9] ont aussi été prises en compte. Il faut noter que les prévisions issues du modèle numérique tri-dimensionnel de flexure (figure 3b) rendent compte précisément des variations des plus faibles contraintes horizontales observées en mer du Nord septentrionale (figure 3c). L'existence de ces variations contribue donc elle-même à renforcer l'hypothèse d'un champ de contraintes largement affecté, au large de la Norvège, par les phénomènes de déglaciation.

Wiprut et Zoback [26] ont souligné que la réactivation en jeu inverse d'une ancienne faille normale dans le champ pétrolifère de Visund (figure 2) est due à l'accroissement récent de la contrainte horizontale résultant de la flexure. La réactivation de cette faille a d'ailleurs provoqué la migration d'hydrocarbures à partir d'un réservoir contigu à cette faille (figure 4a). Les contraintes induites par la déglaciation jouent donc un rôle important, non seulement à l'échelle régionale, mais aussi jusque dans le détail des réactivations locales de failles.

3. La déglaciation a-t-elle provoqué la sismicité de la région « New Madrid » ?

La zone sismique de New Madrid (NMSZ) a subi trois grands séismes en 1811–1812. De plus, les données de paléo-liquéfaction suggèrent que d'autres séismes majeurs se sont produits à des intervalles de 2 à 9 siècles pendant les derniers milliers d'années. Ces séismes préhistoriques, tout comme ceux de 1811–1812, ont dû avoir des magnitudes d'au moins 7,5, susceptibles de rendre compte de l'ampleur des phénomènes de liquéfaction reconnus dans de vastes secteurs. Toutefois, les données abondantes de prospection

par réflexion sismique dans la NMSZ révèlent fort peu de décalages de failles dans les sédiments d'âge post-Crétacé de la région du bas Mississippi [11] : il est donc très probable que le haut niveau de sismicité de la période Holocène ne peut être extrapolé à des périodes plus anciennes [22]. La NMSZ correspond à peu près à une ancienne zone de rift intra-plaque, dont l'activité remonte au Précambrien tardif et/ou au début du Paléozoïque [19]. Les données géologiques et géophysiques révèlent, en outre, un épisode d'activité magmatique au Crétacé [12, 30]. Pour ces raisons, la structure de la croûte dans la NMSZ diffère nettement de celle des régions environnantes. Les données aéro-magnétiques révèlent de plus l'existence de grandes intrusions ultrabasiques en bordure du rift avorté [12], tandis que les données de réfraction sismique et de gravimétrie indiquent la présence d'une masse dense sous le rift, avec des vitesses sismiques hautes à la base de la croûte [20, 24].

Dans ce contexte d'une structure crustale anormale, diverses hypothèses ont pu être proposées, afin de rendre compte de l'activité sismique de la NMSZ. Grana et Richardson [7] ont ainsi envisagé une concentration de contraintes induite par la masse dense sous le rift, induisant elle-même les séismes. Pour Liu et Zoback [17], la sismicité élevée est le résultat de l'existence de taux de déformation ductile élevés dans la croûte inférieure et le manteau supérieur, taux pouvant résulter eux-mêmes d'un flux de chaleur localement élevé. Stuart et al. [24] considèrent qu'une zone de faille de détachement, mécaniquement peu résistante, dans la croûte inférieure peut être à l'origine d'une concentration de contraintes, provoquant la sismicité constatée. Mais il faut observer qu'aucune de ces hypothèses ne peut rendre compte de l'accroissement de l'activité sismique à l'Holocène.

Nous avons analysé l'influence possible de la déglaciation sur l'apparition d'une sismicité importante. La coïncidence temporelle entre la fusion de la calotte glaciaire des Laurentides (entre –19 000 et –8 000 ans) et cet accroissement de sismicité dans la NMSZ est frappante. James et Bent [14] ont montré que la déglaciation modifie de façon significative les taux de déformation, même à des distances de plusieurs centaines de kilomètres du front de la calotte glaciaire. Néanmoins, en faisant appel à une calotte circulaire de géométrie simplifiée (circulaire) et à une superposition linéaire des relations contraintes–déglaciation, avec une lithosphère supposée élastique et homogène, ces auteurs ont conclu à l'absence d'influence de la déglaciation sur l'accroissement de la sismicité. Plus récemment, Wu et al. [29], avec également un modèle de lithosphère élastique homogène, ont adopté une configuration plus réaliste pour la forme de la calotte glaciaire. Ils aboutissent à la conclusion que la sismicité dans la NMSZ doit avoir commencé il y a environ 200 ans, bien que la zone où cette sismicité est censée être apparue ne corresponde pas à la région de New Madrid.

Dans notre étude, nous faisons à nouveau appel à un modèle numérique d'éléments finis tri-dimensionnel, mettant en jeu des rhéologies lithosphériques réalistes, afin d'ex-

plorer les possibilités d'interaction entre les forces faisant mouvoir les plaques, les perturbations de contrainte induites par la déglaciation et l'hétérogénéité des propriétés de la lithosphère dans la région. Notre étude ne vise, ni à rendre compte de la sismicité sur une faille donnée, ni à décrire la sismicité d'ensemble de l'Est des États-Unis. Nous cherchons plutôt à savoir si la déglaciation est ou non une cause plausible du déclenchement d'une sismicité notable dans la NMSZ.

D'après notre modélisation (*figure 4b*), la disparition de la calotte glaciaire des Laurentides, qui recouvrait de vastes zones du Nord des États-Unis jusque vers $-20\,000$ ans environ, a suffisamment modifié le champ de contraintes de la région de New Madrid pour accroître les taux de déformation sismique d'environ trois ordres de grandeur. Dans ce contexte, ainsi que Grollmund et Zoback l'ont montré [8], la localisation de la sismicité résulte directement de l'existence d'une lithosphère aux propriétés particulières, découlant principalement de la présence du rift précambrien. Considérant le risque sismique dans cette région, nous soulignons que la modélisation prédit que le haut taux de dissipation d'énergie sismique observé pour l'Holocène devrait probablement perdurer pendant les quelques milliers d'années à venir (*figure 4b*).

4. Conclusion

Comme l'on sait, la fusion de la calotte glaciaire en Fennoscandinavie a provoqué un soulèvement notable des régions anciennement couvertes par les glaces. Par une modélisation du phénomène de flexuration de la lithosphère, nous montrons que cette déglaciation est une source importante de variations de contraintes régionales

dans le domaine de la mer du Nord septentrionale et de ses marges. L'information sur les contraintes actuelles et sur leur variation dans l'espace que nous avons utilisée pour contraindre nos modèles, provient des mécanismes au foyer des séismes et de diverses déterminations dans les puits de forage. Nous avons ainsi exploré les effets possibles de la disparition des glaces et de la flexure lithosphérique qui l'accompagne sur les régimes de contrainte locaux au large de la Norvège. Il apparaît ainsi qu'une grande partie de la sismicité récente de cette région est directement imputable aux variations de contrainte induites par la déglaciation.

D'une manière comparable, notre modélisation montre que le retrait de la calotte glaciaire des Laurentides (qui recouvrait de vastes régions des États-Unis jusque vers environ $-20\,000$ ans) a considérablement modifié le champ de contraintes de la région de New Madrid, en y accroissant les taux de déformation sismique d'environ trois ordres de grandeur. Si l'on tient compte des propriétés particulières de la lithosphère de ce secteur, liées à la présence d'un rift ancien, cette modification explique la sismicité anormalement élevée observée dans cette région. La modélisation indique en outre que l'activité sismique élevée se maintiendra vraisemblablement durant les quelques milliers d'années à venir.

Cette modélisation ouvre donc une piste pour déterminer si, dans d'autres régions de notable sismicité intra-plaque, dans l'Est de l'Amérique du Nord ou en Europe occidentale, l'activité sismique est imputable aux changements de contraintes associés à la déglaciation et/ou à des propriétés anormales de la lithosphère. Des études dans ce domaine sont à entreprendre.

1. Introduction

It is well known that passive continental margins at high latitudes are frequently associated with anomalously high seismicity. Two well-studied examples are the passive margin of eastern Canada [13, 23] and the Norwegian margin [3]. Stein et al. [23] proposed a model, in which the increased seismicity is due to flexural stresses generated by the removal of ice sheets. While plate tectonics provides a comprehensive conceptual framework for understanding earthquakes located along plate boundaries around the world, the geologic processes that control the occurrence of intraplate earthquakes remain poorly understood. The influence of ice melting would explain why increased passive margin seismicity is restricted to high latitudes, which makes this model very appealing. *Figure 1* shows the distribution of intraplate seismicity in eastern North America and western Europe as well as an indication of ice extent during the last glacial maximum $\sim 20\,000$ years ago.

Most models of post-glacial rebound have considered the lithosphere as purely elastic, ignoring the possibility for intra-lithospheric viscous deformation. This is a good approximation for the purpose of reproducing post-glacial uplift because modeled uplift is mostly governed by sub-lithospheric rheologies. However, Klemann and Wolf [15] suggest that viscous behavior within the lithosphere might be crucial for modeling stress changes associated with post-glacial rebound. In fact, the results of our models demonstrate that the observed stress patterns can only be explained if the lower lithosphere undergoes permanent viscous deformation during the ice sheet's existence.

To investigate the effect of ice loading on seismicity, we have used three-dimensional finite element models including realistic ice sheet geometries and lithospheric rheologies. The purpose of our models is to reproduce stress variations in the general vicinity of the former ice sheet front. These local stress variations are most likely unaffected by viscosity variations at great depth, rheological behavior at more shal-

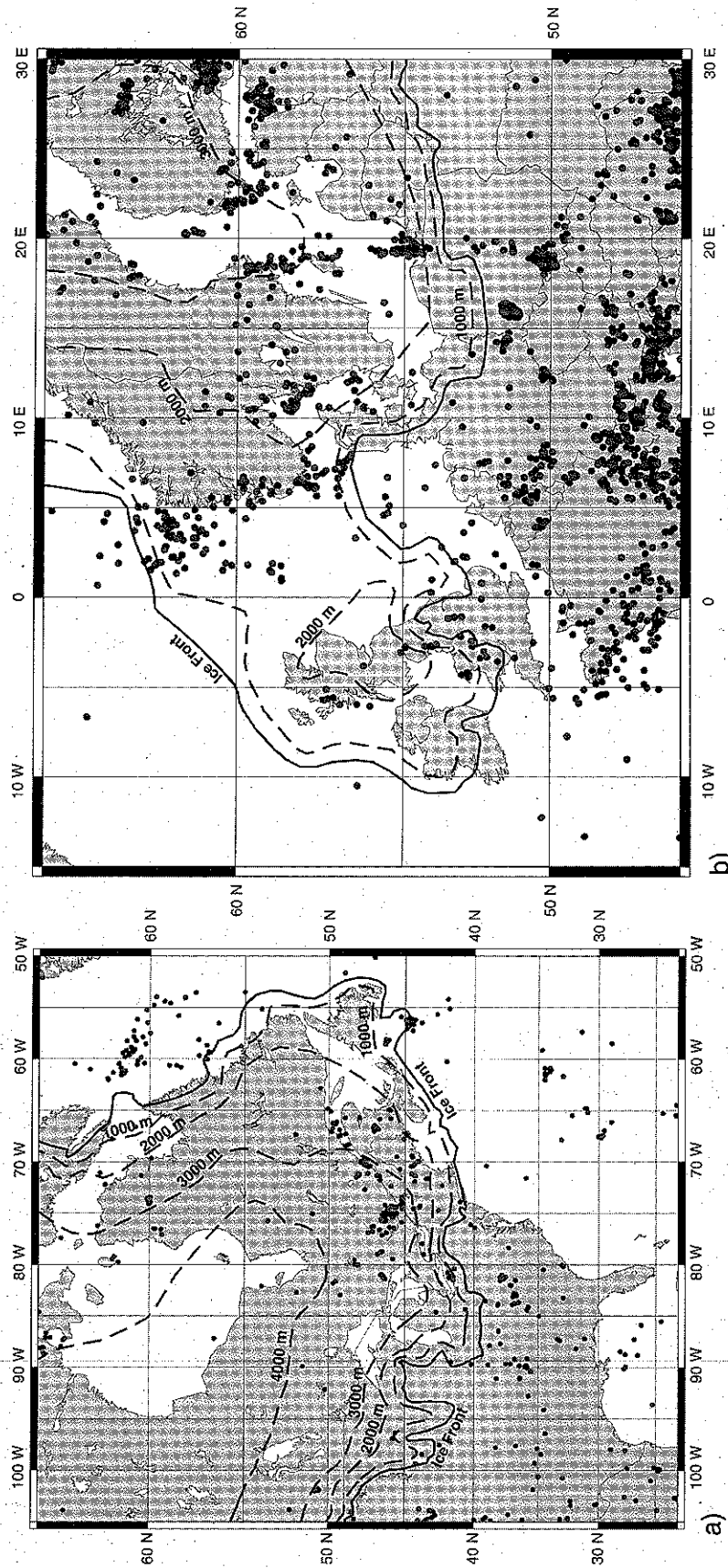


Figure 1. a. Distribution of $M \geq 3.5$ and above earthquakes in eastern North America and maximum extent and thickness of Laurentide ice sheet approximately 20 000 years ago. b. $M \geq 3.5$ and above earthquakes in western Europe and the maximum extent and thickness of the Weichselian ice sheet 20 000 years ago.

Figure 1. a. Distribution des séismes de magnitude $M \geq 3,5$ ou supérieure dans l'Est de l'Amérique du Nord; extension maximum et épaisseur de la calotte glaciaire des Laurentides, il y a environ 20 000 ans. b. Séismes de magnitude $M \geq 3,5$ ou supérieure en Europe occidentale; extension maximum et épaisseur de la calotte glaciaire il y a environ 20 000 ans.

low depth is more important. For this reason, we have adopted a relatively simple model representation of the sub-lithospheric units while focusing on a detailed representation of lithospheric rheologies. The good match of our model results with the observations, both stress and uplift, indicates that our approach is adequate. For the purpose of brevity, we will not discuss uplift results.

To rigorously test the hypothesized influence of ice removal on passive margin seismicity, the knowledge of the in situ stress field, including stress orientations, magnitudes and lateral changes, is crucial. The Norwegian margin is a perfect laboratory for investigating the influence of ice removal on the local stress field because offshore drilling operations associated with hydrocarbon exploration provide an extensive stress data set. In the New Madrid seismic area of the central US, we modeled the interaction between large-scale plate driving forces, lithospheric structure and the stresses induced by bending of the lithosphere as a result of glacial loading and unloading in central North America.

2. Deglaciation, in situ stress and earthquakes in the Northern North Sea

It is well known that uplift data and shoreline tilt measurements have been used extensively to constrain models of post-glacial rebound. Estimates of lithospheric thickness ($T_{\text{lithosphere}}$) for Fennoscandia obtained from models of post-glacial rebound vary widely. McConnell [18] suggested a lithospheric thickness of 120 km. Cathles [4] and Anundsen and Fjeldskaar [1] estimated $T_{\text{lithosphere}}$ to be ~ 70 km. The estimate for $T_{\text{lithosphere}} = 110$ km by Wolf [27] is based on an equilibrium model and therefore represents an upper bound. The estimate of Lambeck et al. [16] for $T_{\text{lithosphere}}$ between 100 and 150 km is considerably higher than the finding of $T_{\text{lithosphere}} \sim 40$ km [5]. More recently, Fjeldskaar estimates $T_{\text{lithosphere}}$ between 20 and 50 km [6]. A more detailed discussion of lithospheric thickness estimates can be found in Wolf [28]. In summary, the lithospheric thickness in Fennoscandia is poorly constrained and estimates vary depending on the data sets against which the models were calibrated. Lateral changes in lithospheric thickness might also explain the discrepancies between the estimates of different authors. Breuer and Wolf [2] suggest that the lithospheric thickness varies laterally near Spitsbergen, and Fjeldskaar [6] proposes a decrease in lithospheric thickness from central Fennoscandia towards western Norway. We utilize a lithospheric thickness of ~ 50 km, following Fjeldskaar and Cathles [5].

South of the Norwegian Margin, in northwestern Europe, the orientation of the maximum horizontal stress (S_{Hmax}) strikes consistently northwest to north-northwest [21] and a strike-slip/normal faulting regime ($S_v > S_{\text{Hmax}} > S_{\text{Hmin}}$) is generally observed. Geodynamic models show that this consistent S_{Hmax} orientation results from the interaction between sea floor spreading at the Mid-Atlantic ridge and the collision of the Eurasian plate with the African plate [10]. However, in the area of the Northern North Sea, precise stress orientation data from drilling-induced tensile wall fractures in oil and gas wells show that the orientation of maximum horizontal stress rotates in the vicinity of the former ice margin and does not correspond to the large-scale plate driving direction seen to the south. We believe this rotation is due to lithospheric flexure caused by deglaciation. It is clear in *figure 2* that S_{Hmax} roughly strikes east–west at $\sim 61^\circ\text{N}$, 3°E , the area of principal interest in this study.

In addition, investigation of stress magnitudes reveals significant changes of the least principal stress over relatively small distances. This transition from high to low stress magnitudes towards the Norwegian coast is indicated by earthquake focal plane mechanisms that are mostly reverse faulting far from the coast but strike-slip or even normal faulting closer to the coast (*figure 2*). Stein et al. [23] and Walcott [25] have shown that this type of spatial stress variation can be the result of flexural stresses associated with deglaciation. Thus, we seek to test whether the occurrence of seismicity in response to high horizontal stress offshore Norway (as well as the observed stress variations) are the result of lithospheric bending due to glacial unloading and lithospheric flexure.

Figure 3 shows the result of our three-dimensional modeling of the stress field in the Norwegian North Sea. *Figure 3a* shows that stresses induced by lithospheric flexure do a very good job of explaining both the average east–west stress orientation observed in the northern North Sea as well as the subtle ‘swing’ of maximum horizontal stress orientations from WNW–ESE on the west side of the Viking graben to ENE–WSW on the east side of the graben. We have also considered data on the magnitude of the least horizontal principal stress obtained from a study of approximately 400 wells offshore Norway [9]. Note that the predictions of the three-dimensional flexure model (*figure 3b*) accurately reproduces the variation of least horizontal stress magnitudes observed in the northern North Sea (*figure 3c*). Thus, regional variations of the magnitude of the least principal stress also appear to support the hypothesis that the stress field offshore Norway has been strongly affected by deglaciation.

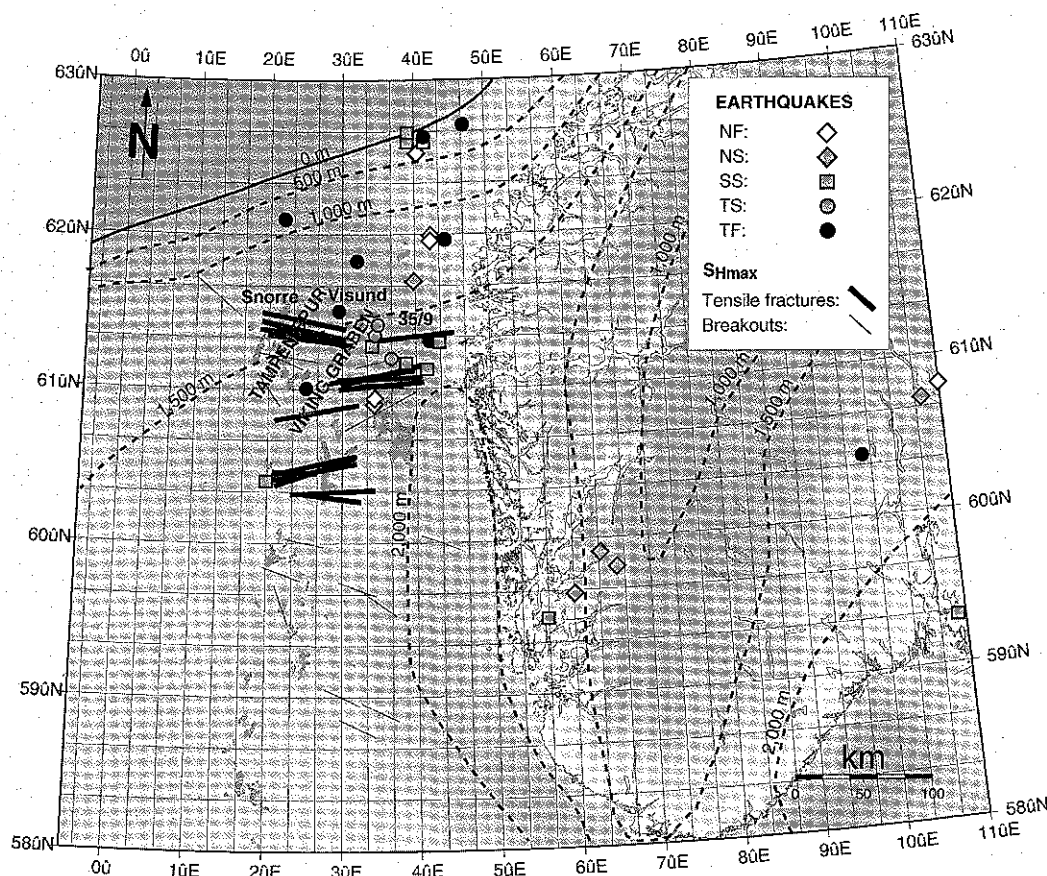


Figure 2. Overview map of western Norway and the northern North Sea. The bold lines show S_{Hmax} orientations inferred from drilling induced tensile fractures [26] and the narrow black lines illustrate S_{Hmax} orientations from borehole breakouts. S_{Hmax} rotates from N100°E west of the Viking Graben to N80°E closer to the coast. The circles, squares and diamonds show locations of earthquakes with their respective faulting regime. The dashed lines are isolines of ice sheet thickness for the maximum extent 20 000 years ago from Andersen. The light gray areas illustrate the lateral extents of known hydrocarbon fields.

Figure 2. Carte générale de la Norvège occidentale et de la mer du Nord septentrionale. En trait noir gras, orientations de S_{Hmax} d'après les fractures en tension accompagnant les forages [26]. En trait noir fin, orientations de S_{Hmax} d'après les ovalisations de forages. La direction de S_{Hmax} change de N100°E (à l'ouest du « Viking Graben ») à N80°E (plus près de la côte). Les cercles, carrés et losanges montrent les localisations des séismes correspondant à différents régimes. En lignes tiretées, courbes d'égale épaisseur de la calotte glaciaire à son apogée il y a 20 000 ans, d'après Andersen. Les domaines en gris clair correspondent à l'extension latérale connue des champs pétrolifères.

Finally, Wiprut and Zoback [26] argue that reactivation of a dormant normal fault in the Visund oil field (see location in figure 2) as a reverse fault is the result of the recently-induced high horizontal stresses induced by glacial flexure. As shown in figure 4a, reactivation of this fault appears to be responsible for leakage of hydrocarbons from a reservoir abutting this fault. Thus, the stresses induced by deglaciation seem to be responsible both for the pattern of stresses currently observed in the region as well as the reactivation of dormant faults.

3. Deglaciation as a possible trigger for New Madrid seismicity

The New Madrid seismic zone (NMSZ) experienced three major earthquakes in 1811–1812, and

palaeo-liquefaction data suggest that very large, New Madrid type events have occurred every 200–900 years during the past several thousand years. These prehistoric events, along with the 1811–1812 earthquakes, must have had moment magnitudes of 7.5, or larger, to have been big enough to cause the severe liquefaction observed over large areas. However, extensive seismic reflection data in the NMSZ show relatively small cumulative fault offsets in the post-Cretaceous Mississippi embayment sediments [11], which implies that the level of seismicity observed in Late Holocene time could not have lasted much longer [22]. The NMSZ is broadly associated with an ancient intraplate rift zone principally active during Latest Precambrian and/or Early Palaeozoic time [19]. Geological and geophysical data also indicate an episode of Cretaceous magmatic activity [12, 30]. As a re-

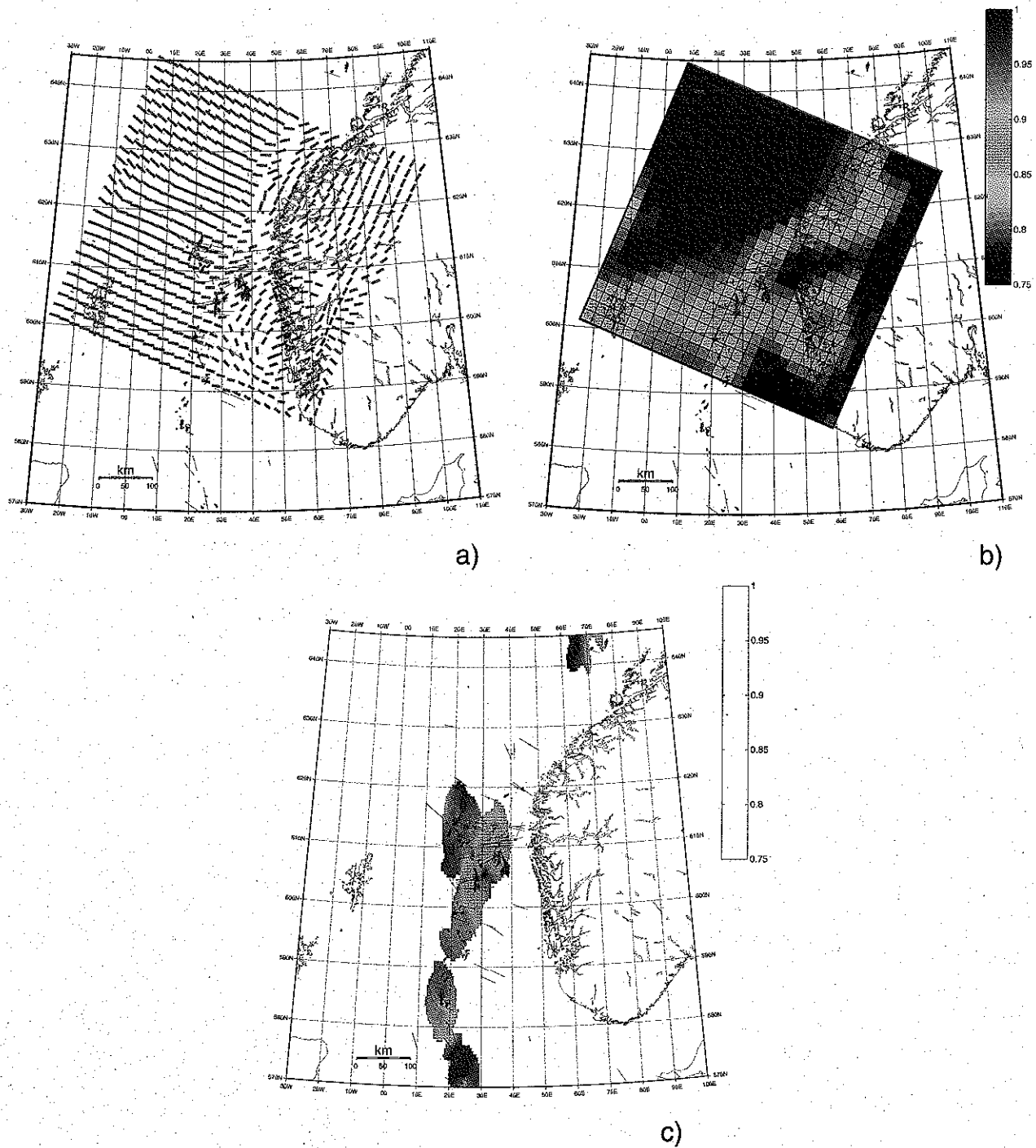


Figure 3. a. Modeled S_{Hmax} orientation for the best fitting North Sea model at a depth of 3 000 m. The gray lines show the modeled results of S_{Hmax} , which can be compared to the borehole measurements (black lines). The model fits the observations extremely well, suggesting that deglaciation causes the observed spatial stress variations and that the model rheology represents the lithosphere. **b.** Modeled S_{Hmin}/S_v for the best-fitting model at a depth of 3 000 m. **c.** Observed S_{Hmin}/S_v from leak off tests in oil and gas wells. Note that the model reproduces the observed drop of S_{Hmin}/S_v towards the coast and is also able to capture the spatial variations of S_{Hmin}/S_v .

Figure 3. a. Orientations calculées S_{Hmax} pour le modèle le mieux ajusté (voir texte) en mer du Nord, à une profondeur de 3 000 m. Lignes grises, modélisation des orientations de S_{Hmax} , à comparer avec les données (lignes noires). Le modèle rend parfaitement compte des observations, ce qui suggère que la déglaciation est la cause des variations spatiales de la contrainte et aussi que la rhéologie adoptée représente bien celle de la lithosphère. **b.** Rapport S_{Hmin}/S_v calculé pour le modèle le mieux ajusté, à une profondeur de 3 000 m. **c.** Rapport S_{Hmin}/S_v observé en fonction des tests d'écoulement dans les puits pétroliers. Le modèle reproduit la chute observée du rapport S_{Hmin}/S_v en direction de la côte, ainsi que d'autres variations spatiales de S_{Hmin}/S_v .

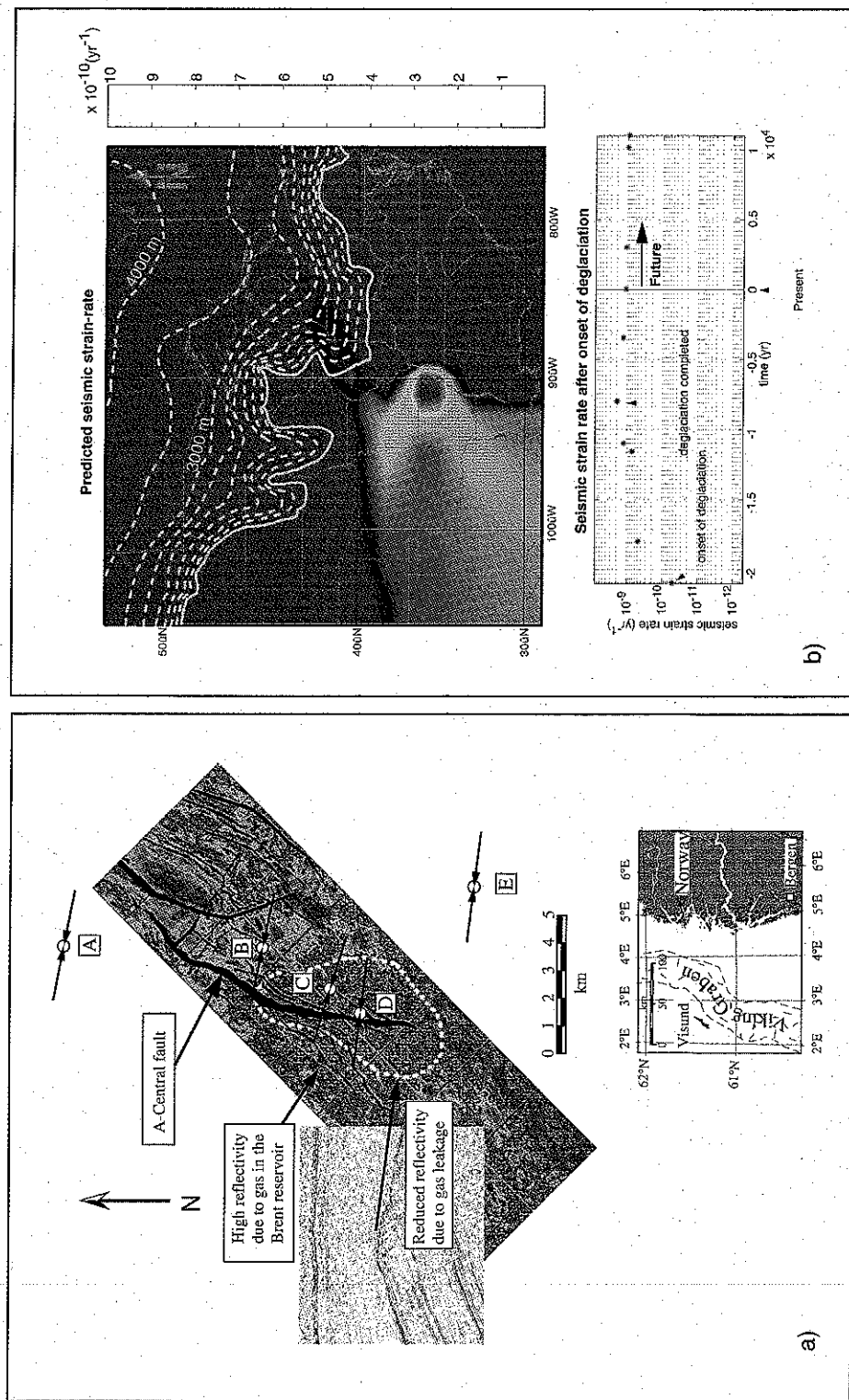


Figure 4. a. The A central fault in the Visund field was a dormant, ~ north–south trending normal fault which has been reactivated as a reverse fault in the past ~ 15 000 years due to compressive east–west directed stresses resulting from deglaciation [26]. The upper figure shows the reflectivity of the Brent horizon and low reflection amplitude indicates an area where gas has leaked out of a footwall reservoir along the fault as a result of reactivation. The solid lines indicate the direction of maximum horizontal compression as determined from extensive drilling-induced tensile fractures in oil wells in the area. **b.** Predicted present-day intraplate seismic strain rates at a depth of 12 000 m. The zone of increased seismicity is centered on the NMSZ. The highest present-day strain rates are close to 10⁻⁹ yr⁻¹, almost three orders of magnitude higher than the background seismic strain rate of 10⁻¹² yr⁻¹ [8]. Seismic strain rates in the area are expected to remain high for at least 10 000 years into the future is shown.

Figure 4. a. Cas de la mer du Nord, Europe occidentale : la faille centrale du champ de Visund, une faille normale inactive dirigée à peu près nord–sud, réactivée en jeu inverse pendant les derniers 15 000 ans à cause de l'existence d'un champ de contrainte en compression est–ouest, résultant de la déglaciation [26]. Sur la figure du haut, réflectivité sismique du niveau Brent et zone de modeste réflection, soulignant un domaine où les hydrocarbures se sont écoulés d'un réservoir du compartiment inférieur le long de la faille, à cause de sa réactivation. Lignes continues, direction de contrainte compressive horizontale maximum indiquée par la fracturation en tension accompagnant les forages pétroliers dans ce secteur. **b.** Cas de la région de New Madrid, centre des États-Unis d'Amérique : taux de déformation sismique intra-plaque actuelle prédits par le modèle pour une profondeur de 12 000 m. La zone de sismicité accrue est centrée sur la NMSZ. Les plus forts taux de déformations actuels avoisinent 10⁻⁹ an⁻¹, soit presque 1 000 fois le taux de déformation sismique environnant, 10⁻¹² an⁻¹ [8]. Ces taux devraient se maintenir pendant au moins 10 000 ans.

sult, crustal structure in the NMSZ is quite anomalous with respect to the surrounding region. Aeromagnetic data provide evidence for the existence of the large mafic intrusions at the boundaries of the failed rift [12], and seismic refraction and gravity studies reveal an anomalously dense 'rift pillow' with high velocities at the base of the crust beneath the rift [20, 24].

In the context of this anomalous crustal structure, a number of hypotheses have been proposed to explain the spatial concentration of seismicity in the NMSZ. Grana and Richardson [7] propose a stress concentration due to the rift pillow as possibly the reason for increased seismicity in the area. Liu and Zoback [17] proposed that the high rate of seismicity results from high ductile strain rates in the lower crust and upper mantle due possibly to locally elevated heat flow. Stuart et al. [24] suggest the existence of a weak subhorizontal detachment fault in the lower crust directly above the rift pillow as the cause of a stress concentration leading to the observed seismicity. Unfortunately, each of these hypotheses fails to explain the sudden seismicity increase during the Holocene.

We have also investigated the possible influence of deglaciation on the onset of increased seismicity. The temporal coincidence between melting of the Laurentide ice sheet (between 19 000 and 8 000 years ago), and the onset of increased seismicity in the NMSZ is striking. James and Bent [14] demonstrated that deglaciation significantly changes strain rates, even several hundred kilometers away from the ice sheet front. However, using a simplified circular geometry for the ice sheet and linear superposition of calculated deglaciation-related stress changes using a homogeneous elastic lithosphere and assumed tectonic stresses, they concluded that deglaciation did not promote seismicity. More recently, Wu et al. [29], who also considered a homogenous elastic lithosphere, consider a more realistic ice sheet geometry. They predict seismicity in the NMSZ to have begun about 200 years ago, although the region in which it is predicted to have occurred is not localized to the New Madrid area.

In our study, we again utilized a three-dimensional finite element model to incorporate realistic lithospheric rheologies and explore the coupled interaction between plate driving forces, the stress perturbations caused by deglaciation and heterogeneous lithospheric properties. The aim of our study was not to accurately predict seismicity on a selected fault, nor to give a general description of seismicity in the eastern United States. Rather, we examine whether deglaciation could be a possible candidate

for triggering Holocene seismicity in the region of the NMSZ.

Our modeling (*figure 4b*) shows that the removal of the Laurentide ice sheet that covered large parts of the northern United States until approximately 20 000 years ago changed the stress field in the vicinity of New Madrid in such a way as to cause seismic strain rates to increase by about three orders of magnitude. As discussed by Grollimund and Zoback [8], the localization of seismicity is the direct result of anomalous lithospheric properties associated with the ancient Precambrian rift. With respect to seismic hazard in the region, it is important to note that our modeling predicts that the high rate of seismic energy release observed during Late Holocene time is likely to remain essentially constant for the next few thousand years (*figure 4b*).

4. Summary

While it is well known that the melting of the Fennoscandian ice sheet caused significant uplift of the formerly glaciated areas, through modeling this lithospheric flexure in detail we demonstrated that deglaciation is an important source of regional stress variations in the northern North Sea and margin. We used stress information derived from earthquake focal plane mechanisms and from a variety of wellbore measurements to constrain spatial variations of stress. We have used these stress data to constrain finite element models to investigate the effects of glacial melting and the associated flexuring of the lithosphere on the local stress field offshore Norway. The comparison of the model results with the observed stresses is quite good suggesting that much of the recent seismicity in the region appears to be a direct result of stresses induced by deglaciation.

Our modeling also shows that the removal of the Laurentide ice sheet that covered large parts of the northern United States until approximately 20 000 years ago changed the stress field in the vicinity of New Madrid and caused seismic strain rates to increase by about three orders of magnitude in the area. The modeling predicts that the high rate of seismic energy release observed during Late Holocene time is likely to remain essentially constant for the next few thousand years. We believe that seismicity is localized in the New Madrid area because of the anomalous lithospheric properties associated with rift zone in the area.

Knowing if sites of intraplate seismicity at other areas of eastern North America and western Europe are related to stresses associated with deglaciation and/or anomalous lithospheric properties will require detailed analysis.

References

- [1] Anundsen K., Fjeldskaar W., Observed and theoretical Late Weichselian shore-level changes related to glacier oscillations at Yrkje, south-west Norway, in: Schroeder-Lanz H. (Ed.), *Late- and Postglacial Oscillations of Glaciers: Glacial and Periglacial Forms*, Balkema, Rotterdam, 1983, pp. 133–170.
- [2] Breuer D., Wolf D., Deglaciation land emergence in Svalbard: evidence of lateral inhomogeneity in the upper mantle, *Geophys. J. Int.* 121 (3) (1995) 775–788.
- [3] Bungum H., Alsaker A., Kvamme L.B., Hansen R.A., Seismicity and seismotectonics of Norway and nearby continental shelf areas, *J. Geophys. Res.* 96 (B2) (1991) 2249–2265.
- [4] Cathles L.M., *The Viscosity of the Earth's Mantle*, Princeton University Press, Princeton, 1975, 386 p.
- [5] Fjeldskaar W., Cathles L., Rheology of mantle and lithosphere inferred from post-glacial uplift in Fennoscandia, in: Sabadini R., Lambeck K., Boschi E. (Eds.), *Glacial Isostasy, Sea-level and Mantle Rheology*, Kluwer, Dordrecht, 1991, pp. 1–19.
- [6] Fjeldskaar W., Flexural rigidity of Fennoscandia inferred from the postglacial uplift, *Tectonics* 16 (4) (1997) 596–608.
- [7] Grana J.P., Richardson R.M., Tectonic stress within the New Madrid seismic zone, *J. Geophys. Res.* 101 (1996) 5445–5458.
- [8] Grollmund B., Zoback M.D., Did deglaciation trigger New Madrid seismicity?, *Geology* (in press).
- [9] Grollmund B., Zoback M.D., Wiprut D.J., Arnesen L., Regional synthesis of stress orientation, pore pressure and least principle stress data in the Norwegian sector of the North Sea, *Petroleum Geoscience* (in press).
- [10] Grünthal G., Stromeyer D., The recent crustal stress field in Central Europe – trajectories and finite element modeling, *J. Geophys. Res.* 97 (8) (1992) 11805–11820.
- [11] Hamilton R.M., Zoback M.D., Tectonic features of the New Madrid seismic zone from seismic reflection profiles, in: US Geological Survey Professional Paper, 1236-F, 1981, pp. 55–82.
- [12] Hildenbrand T.G., Rift structure of the Northern Mississippi Embayment from the analysis of gravity and magnetic data, *J. Geophys. Res.* 90 (1985) 12607–12622.
- [13] Hasegawa H.S., Basham P.W., Spatial correlation between seismicity and post-glacial rebound in Eastern Canada, in: Gregersen S., Basham P.W. (Eds.), *Earthquakes at North-Atlantic Passive Margins: Neotectonics and Postglacial Rebound*, Kluwer, 1989, pp. 483–500.
- [14] James T.S., Bent A.L., A comparison of eastern North American seismic strain-rates to glacial rebound strain-rates, *Geophys. Res. Lett.* 21 (1994) 2127–2130.
- [15] Klemann V., Wolf D., Modelling of stresses in the Fennoscandian lithosphere induced by Pleistocene glaciations, *Tectonophysics* 294 (1998) 291–303.
- [16] Lambeck K., Johnston P., Nakada M., Holocene glacial rebound and sea-level change in NW Europe, *Geophys. J. Int.* 103 (1990) 451–468.
- [17] Liu L., Zoback M.D., Lithospheric strength and intraplate seismicity in the New Madrid Seismic Zone, *Tectonics* 16 (1997) 585–595.
- [18] McConnell R.K., Viscosity of the mantle from relaxation time spectra of isostatic adjustment, *J. Geophys. Res.* 73 (1968) 7089–7105.
- [19] McKeown F., in: *Overview and discussion*, US Geological Survey Professional Paper, Vol. 1236, 1982, pp. 1–14.
- [20] Mooney W.D., Andrews M.C., Ginzburg A., Peters D.A., Hamilton R.M., Crustal structure of the northern Mississippi Embayment and a comparison with other continental rift zones, *Tectonophysics* 94 (1983) 327–348.
- [21] Müller B., Zoback M.L., Fuchs K., Mastin L., Gregersen S., Pavoni N., Stephansson O., Ljunggren C., Regional patterns of tectonic stress in Europe, *J. Geophys. Res.* 97 (B8) (1992) 11783–11803.
- [22] Schweig E.S., Ellis M.A., Reconciling short recurrence intervals with minor deformation in the New Madrid Seismic zone, *Science* 264 (1994) 1308–1311.
- [23] Stein S., Cloetingh S., Sleep N.H., Wortel R., Passive margin earthquakes, stresses and rheology: earthquakes at North-Atlantic passive margins, in: Gregersen S., Basham P.W. (Eds.), *Neotectonics and Postglacial Rebound*, Kluwer, 1989, pp. 231–259.
- [24] Stuart W.D., Hildenbrand T.G., Simpson R.W., Stressing of the New Madrid Seismic Zone by a lower crust detachment fault, *J. Geophys. Res.* 102 (1997) 27623–27633.
- [25] Walcott R.I., Isostatic response to loading of the crust in Canada, *Can. J. Earth Sci.* 7 (1970) 716–727.
- [26] Wiprut D., Zoback M.D., Fault reactivation and fluid flow along a previously dormant normal fault in the northern North Sea, *Geology* 28 (7) (2000) 595–598.
- [27] Wolf D., A method of calculating lithosphere thickness from observations of deglaciation land uplift and tilt, *J. Geophys.* 60 (1) (1986) 28–32.
- [28] Wolf D., The changing role of the lithosphere in models of glacial isostasy: a historical review, *Global Planet Change* 8 (1993) 95–106.
- [29] Wu P., Johnston P., Lambeck K., Postglacial rebound and fault instability in Fennoscandia, *Geophys. J. Int.* 139 (1999) 657–670.
- [30] Zoback M.D., Hamilton R.M., Crone A.J., Russ D.P., McKeown F.A., Brockman S.R., Recurrent intraplate tectonism in the New Madrid seismic zone, *Science* 209 (1980) 971–976.

