Lithospheric structure in Central Europe : integrated geophysical modelling

Michal Grinc

▶ **To cite this version:**

Michal Grinc. Lithospheric structure in Central Europe : integrated geophysical modelling. Earth Sciences. Université Paris Sud - Paris XI; Univerzita Komenského (Bratislava). Prirodovedecka fakulta, 2013. English. NNT : 2013PA112237 . tel-00921044

HAL Id: tel-00921044

https://theses.hal.science/tel-00921044

Submitted on 19 Dec 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Détermination d’un modèle lithosphérique en Europe centrale: modélisation géophysique intégrée

Introduction

L´exploration géophysique est une partie intégrante, bien que très souvent méconnu de prospection géologique. Un avantage évident est sa nature non invasive, l'efficacité et l'efficience, que ce soit en exploration peu profonde ou profonde. Ses adversaires soulignent au contraire, le besoin de données *a priori* et la corrélation souvent controversée des données géophysiques avec la réalité géologique. Avec le développement des ordinateurs, une combinaison appropriée de plusieurs méthodes géophysiques est devenue possible, ce qui permet aujourd'hui des études complètes dans les domaines de la géophysique et atténue cette critique. La géophysique s'avère une méthode unique notamment dans l'analyse et la recherche de structures profondes, du cadre tectonique, mais il peut être également très utile pour résoudre les problèmes de l'évolution géodynamique des zones et régions étudiées. Toutefois, ses avantages peuvent aussi bien se défendre en exploration géologique peu profonde pour les besoins de l'hydrogéologie, la géologie et de la géologie de l'environnement.

La présente thèse doctorale est divisée en plusieurs parties logiques. Dans le premier je décris la géologie fondamentale de la région et je résume les résultats des levés géophysiques précédents. La deuxième partie est consacrée à des principes généraux, la méthodologie et le traitement des données de la modélisation géophysique en deux dimensions (2D), de l'inversion en trois dimensions (3D) et la modélisation géophysique en trois dimensions (3D). La troisième partie est consacrée aux résultats obtenus. Le travail a été effectué successivement sur deux sites, parce que l'étude est conçue comme un doctorat en cotutelle. Une partie de l'étude a été dirigée par le prof. RNDr. Miroslav Bielik, DrSc. au département de géophysique appliquée et de l'environnement à l'Université de Comenius à Bratislava, et la deuxième partie par le prof. Hermann Zeyen du laboratoire IDES à l'Université Paris-Sud XI.

Ce projet est orienté sur la recherche et l'élargissement de la connaissance de la structure lithosphérique profonde de la région des Carpates et du bassin pannonien. J'ai eu la chance et le plaisir d'introduire dans la recherche slovaque traditionnelle des structures profondes

les nouvelles méthodes scientifiques de modélisation géophysique intégrée en 2D et de 3D basées sur les algorithmes de Zeyen et Fernandez (1994), Motavalli-Anbaran *et al.* (2013) and Fullea *et al*., 2009.

Géologie

La zone d'étude comprend une série de blocs lithosphériques fortement variables qui ont été fusionnés dans les grandes orogenèses européennes du cadomien à l'alpin. La partie nord de la zone d'étude est formée par la plateforme nord-européenne, qui est séparée par la zone de suture transeuropéenne en la plateforme est-européenne précambrienne dans l'est et la plateforme ouest-européenne paléozoïque dans l'Ouest. La plateforme est-européenne est constituée d'un collage de terranes du Gondwana du précambrien et/ou du cadomien fusionnés lors d'événements tectoniques pré-varisques puis recouverts par des dépôts sédimentaires épais. Dans la zone décrite, ces terranes comprennent également le Massif Malopolska et le Massif de Bohême entourant les calédonides germano-polonaises.

Au cours de l'orogenèse alpine, les terranes d'Alacapa et Tisza-Dacia etaient amarrés aux plus âgés, formant l'immense arc orogénique des Alpes orientales et des Carpates. Vers le sud, l'Arc des Carpates tourne autour de la Plateforme Moésienne et se poursuit dans de larges zones orogéniques des Balkanides. La branche sud de l'orogène alpin inclut les Alpes méridionales qui sont liés aux Dinarides, Albanides et Hellénides vers le sud. Toutes ces chaînes de montagnes alpines contournent le grand bassin de Pannonie qui est bordé par des chaînes volcaniques, qui ont été formées par extension arrière-arc au Néogène (Csontos *et al.*, 1992). Dans l'ensemble, le système orogénique alpin de la zone montre une évolution très complexe et aussi une structure compliquée, composée de nombreuses unités et des blocs avec des relations complexes dans l'espace et le temps (Csontos and Vörös, 2004; Schmid *et al.*, 2008; Ustaszewski *et al.*, 2008).

Exploration géophysique précédente

Beaucoup d'études se sont faites dans la région des Carpates et du bassin pannonien basées sur de nombreuses méthodes géophysiques différentes.

Des études antérieures de modélisation de la densité ont été axées principalement sur le développement des zones de collision continentale. Ce sont cependant les données sismiques (sismique réfraction, tomographie sismique) qui fournissent des informations plus détaillées sur les structures lithosphériques. La région de l'Europe centrale a été couverte d'un réseau dense de projets sismiques. Ces projets ont été réalisés dans une vaste coopération internationale, qui comprenait 30 établissements de 16 pays partout en Europe et en Amérique du Nord. Ces projets étaient POLONAISE'97, CÉLÉBRATION 2000, Alp 2002, SUDETES 2003 (Guterch *et al.*, 2003). Les profils sismiques couvrent une vaste zone qui s'étend de la mèr Baltique jusqu'à la mer Adriatique.

La modélisation conjointe de données de geoïde, gravitation, le flux de chaleur et la topographie à l'aide de données géologiques et sismiques, permettait au début des années 2000 de créer un modèle d'épaisseur lithosphérique de la région de Carpates–bassin pannonien et des unités tectoniques adjacentes (Zeyen *et al.*, 2002; Dérerová *et al.*, 2006). Ce modèle d'épaisseur lithosphérique se basait sur les résultats de la modélisation geophysique 2D intégrée basée sur neuf profils.

Une autre approche de modélisation lithosphérique dans la région a été publiée par Tašarová *et al.* (2009). Ces auteurs présentent le résultat d'une modélisation 3D de l'anomalie de Bouguer contrainte par des modèles sismiques et d'autres données géophysiques. Sur ses cartes ils represent la profondeur des limites principales de densité.

Une autre approche utilisée dans l'étude de la structure de la croûte a été réalisée par Csicsay (2010). Il a réalisé la modélisation de la densité le long des quelques profils sismiques (CELEBRATION 2000) et a effectué une modélisation gravimétrique 2D intégrée, qui utilisait des résultats de la modélisation de réfraction sismique. Cette modélisation intégrée était fondée sur les formules les plus utilisées pour la transformation de vitesses sismiques en densité, celles de Sobolev et Babeyko (1994) et celles de Christensen et Mooney (1995).

Méthodologie

La méthodologie de presque tous les travaux de géophysique peut être divisée en deux phases, la phase de préparation des données et la phase d'interprétation elle-même. La structure interne de ces étapes est alors dépendante de la méthode de recherche choisie. Cette thèse traite la recherche de la lithosphère de la région Carpates–Bassin pannonien. La méthode de recherche choisie est la modélisation automatique 1D, la modélisation géophysique 2D intégrée, l'inversion 3D et la modélisation géophysique 3D intégrée. Toutes ces approches ont leur propre méthodologie, qui sont en termes très généraux similaires.

Modélisation 1D

La modélisation uni-dimensionnelle est une méthode très rapide qui nous permet d'établir le premier modèle du Moho et de la LAB (limite lithosphère-asthénosphère) et un aperçu la lithosphère. Cette approche automatique de modélisation a été présentée par Fullea *et al.* (2006). Du point de vue scientifique, c'est une modélisation 1D, mais d'autre part, elle nous donne un regard quasi-3D des limites principales qui nous intéressent dans la zone étudiée.

Cette nouvelle méthode est basée sur la combinaison de données d'élévation et des anomalies du géoïde pour détérminer l'épaisseur de la croûte et la lithosphère de la Terre. La raison pour utiliser de données différentes, est que chacun de ces ensembles de données est sensible à différents phénomènes lithosphériques. La topographie est sensible à la variation de la densité moyenne à l'intérieur de la colonne lithosphérique, tandis que l'anomalie du géoïde dépend de la distribution en profondeur des variations de densité et est proportionnelle au moment dipolaire de la densité (Turcotte et Schubert, 1982). Dans ce cas, seuls deux couches sont considérés: croûte de manteau et la lithosphère.

Modélisation 2D

Nous appliquons la modélisation de la lithosphère intégrée en deux dimensions (logiciel Cages) qui combine l'interprétation du flux de chaleur de surface, du géoïde, de la gravité et des données topographiques de la région des Carpates-bassin pannonien et des régions avoisinantes. Cette approche est capable de contraindre les structures lithosphériques compliquées de la région étudiée mieux que l'interprétation de chaque données geophysique par elle même. Le calcul est

effectué en utilisant la technique des éléments finis, pour relier les différentes équations physiques. Le programme calcule d'abord la distribution de la température dans la lithosphère et via une relation linéaire entre températures et densités, la distribution des densité est calculée qui sert à calculer les variations de topographie, du géoïde et de la gravité. En plus, avec des paramètres rhéologiques données, la répartition de la rigidité de la lithosphèrepeut être calculée (Zeyen et Fernandez, 1994). Nous présentons dans cette thèses quatre modèles 2D intégrés de la lithosphère. Les modèles fournissent des estimations améliorées de la distribution de densité dans la lithosphère et de la profondeur de grandes discontinuités de densité telles que la discontinuité Moho et de la limite lithosphère-asthénosphère.

Inversion 3D

Bien que, l'approche 2D precedement présentée ait des advatages, elle ne peut expliquer la complexité de la structure trois dimensionnelle de la région d'étude. Dans ce cas l'approche 3D est nécessaire (Mottavali-Anbaran *et al.*, 2013). La méthode utilisée est semi-automatique et très rapide. Elle est basé sur une approche bayésienne avec des fonctions de densité de probabilité gaussiennes. Dans un premier temps, nous avons utilisé l'algorithme 3D (GTinv3D) pour obtenir la structure de la densité de la lithosphère à partir de l'inversion conjointe de la gravité, du géoïde et des données topographiques. L'algorithme fournit l'épaisseur de la croûte et de la lithosphère ainsi que la densité moyenne de la croûte. Le processus d'inversion peut être stabilisé à l'aide d'amortissement et d'un paramètre de lissage ainsi que par l'utilisation de l'information a priori comme l'épaisseurs de la croûte basées sur des profils sismiques.

LitMod3D

LitMod3D (*LIT*hospheric *MOD*elling in a *3D* geometry) a été utilisé dans ce travail pour reconstitution d'un modèle 3D, bien que finalement, pas plus d'un débogage approfondi de la version de Windows a été possible. Ce logiciel a été développé par J. Fullea et J. C. Afonso pour effectuer une modélisation géophysique-petrologique intégrée de la lithosphère. L'avantage principal est qu'il combine des données de la thermodynamique, la physique des minéraux, la géochimie, la pétrologie, et la géophysique de la Terre.

LitMod3D est composé de deux modules: un module de calcul directe - LITMOD3D_FOR et un module d'interface interactif - LITMOD3D INTF qui est utilisé pour la

visualisation et la modification des données et du modèle 3D. LITMOD3D_FOR calcule le transfert de chaleur, et les équations thermodynamiques et rhéologiques, les équations des champs potentiels et des équilibres isostatiques (isostasie locale et régionale) pour toute la lithosphères et le manteau supérieur sublithospherique. Les sorties sont la température, le flux de chaleur de surface, la densité, la vitesse sismique, la topographie et les anomalies du géoïde et de la gravité. Le programme permet la modélisation jusqu'à une profondeur de 410 km, avec différentes couches définies par l'utilisateur. Ces couches sont caractérisées par leurs propriétés thermodynamiques (Fullea et al., 2009).

Résultats

Modélisation 1D

La carte de la profondeur du Moho montre d'importantes variations des épaisseurs de la croûte au sein de la zone étudiée, ce qui peut être prévu sur la base de nombreuses études précédentes de la région (Zeyen *et al.*, 2002; Bielik *et al.*, 2004; Dérerová *et al.*, 2006; Csicsay, 2010; Janik *et al.*, 2011; Hauser *et al.*, 2001; 2007; Mocanu and Radulescu, 1994; Beránek and Zátopek, 1981; Guterch *et al.*, 1984; 1986; Čekunov *et al.*, 1988; Čekunov, 1993; Posgay *et al.*, 1995; Tomek *et al.*, 1987, 1989; Tomek and Hall, 1993; Horváth, 1993; et d'autres). On peut constater que l'épaisseur de la croûte augmente du bassin pannonien vers l'E et le NE mais l'épaisseur de la croûte ne cadre pas bien avec les travaux précédents dans certaines parties de la zone étudiée. La croûte la plus épaisse se trouve sous l'arc des Carpates ou sous son avant-pays immédiat. Des valeurs très élevées se trouvent dans les Carpates de l'Est et de la zone de Vrancea (40 km). Au contraire des attentes, la croûte la plus épaisse se trouve dans la petite zone au sud des Carpates (42 km). La platforme de l'Europe de l'Est se caractérise par une croûte épaisse d'environ 36 km comme on la trouve aussi sous les monts d'Apuseni. D'autre part, le bassin pannonien et la plateforme moésienne ont une croûte plus mince que la zone environnante. Ici, nous avons obtenu une épaisseur moyenne de moins de 30 km. La croûte la plus mince se trouvé dans la partie SE du bassin pannonien dans le contact avec les Carpates du Sud où la profondeur est seulement 26 km.

La lithosphère la plus épaisse est placée dans la partie NE de la carte sous la plateforme est-européenne, les Carpates de l'Est et les Carpates du Sud. L'épaisseur de la lithosphère de la plateforme est-européenne est en moyenne plus que 120 km mais là aussi on peut trouver des endroits plus épais dans la partie nord de cette région. Une autre place avec une lithosphère aussi épaisse est la zone de Vrancea. De là, l'épaisseur de la lithosphère baisse vers l'ouest, où l'épaisseur est de moins de 110 km. La tendance à la baisse se poursuit à partir de là aussi vers le sud et atteint un minimum d'épaisseur lithosphérique à la frontière sud des Carpates du Sud et la partie SE du bassin pannonien. Ici, elle est seulement 60 km. Ces valeurs extrêmement basses de l'épaisseur lithosphérique n'ont pas été présentés auparavant. La plateforme moésienne se caractérise par une épaisseur lithosphérique avec une tendance à la baisse de l'est vers l'ouest.

Dans l'est, l'épaisseur est d'environ 110 km et à l'ouest, elle est seulement 80 km. L'épaisseur de la lithosphére Pannonienne varie de 80 à 100 km

Modélisation 2D

Les données de flux de chaleur indiquent un grand degré de dispersion. En général, ces variations sont liées à la circulation d'eau souterraine ou d'effets paléoclimatiques pas proprement corrigés (Kukkonen et al, 1993;. Stulc, 1998). Ces effets ne sont pas inclus dans l'algorithme utilisé, c'est pourquoi notre modèle se traduit par une variation lisse avec un minimum de 50 $mW.m^{-2}$ dans la plateforme est-européenne et un maximum de plus de 80 $mW.m^{-2}$ dans le bassin pannonien. En outre, les données de flux de chaleur que nous avons pris en compte ne sont pas bien répartis dans la zone étudiée. Pour nos modèles régionaux, nous n'interprétons que des variations lisses.

En général, l'épaisseur de la lithosphère diminue à partir des plateformes plus anciennes et plus froides vers le bassin pannonien plus jeune et plus chaud avec une épaisseur maximale dans les Carpates orientales et septentrionales. L'épaisseur de la lithosphère sous l'arc des Carpates varie entre 150 km au Nord à environ 300 km dans la zone de Vrancea. Dans les domaines de plateforme, elle est entre 120 à 150 km et dans le bassin pannonien est d'environ 70 km. Cette épaisseur est plus grande que publiée précédement (par exemple, Horváth, 1993; Lenkey, 1999), mais plus petite que les résultats de Dérerová *et al.* (2006). Ainsi, une partie du flux de chaleur de surface peut s'expliquer par une augmentation de la production de chaleur radioactive dans la croûte supérieure sous le bassin et dans les sédiments. En réduisant l'épaisseur lithosphérique aux valeurs entre 40 et 60 km on éleverait trop la topographie modélisée et ainsi les données calculées seraient incompatibles avec celles observées. L'épaisseur de la lithosphère sous les monts d'Apuseni atteint dans les modèles une profondeur d'environ 120 km et s'épaissit fortement sous le bassin de Transylvanie pour atteindre localement des valeurs de près de 200 km.

Notre modèle apporte quelques caractéristiques intéressantes. Il montre que la plateforme moésienne est chevauchée du nord par les Carpates du Sud et du sud par les Balkanides, ce qui avait été déjà indiqué plus tôt par des études géologiques (Bergerat et al, 2010; Fügenschuh et Schmid, 2005; Iancu *et al.*, 2005; Rabăgia et Matenco, 1999). Ce chevauchement induit une flexion de la Plateforme qui donne une signature caractéristique dans

les observables. Un autre résultat est le fort épaississement lithosphérique sous les Carpates de l'Est et leur avant-pays qui atteint les valeurs de plus de 230 km. Pour une bonne corrélation entre la topographie observée et modélisée et les anomalies du géoïde cet épaississement est nécessaire. L'épaississement peut également être trouvé dans les Carpates de l'Est, mais beaucoup moins important (environ 180 km) et en dessous Carpates de l'Ouest (environ 150 km).

L'épaississement de la lithosphère dans l'Ouest et l'avant-pays des Carpates de l'Est est accompagné d'épaississement de la croûte, sauf dans les Carpates du Sud. Dans tous les transects, l'épaississement de la croûte est décalé vers les domaines de la topographie la plus élevée. L'épaisseur maximale de la croûte dans nos modèles en dehors des orogènes se trouve sous la plateforme mo&sienne avec une épaisseur d'environ 45 km dans certaines régions. Les modèles basés sur les données sismiques sont contradictoires dans la région de Vrancea. Mocanu et Radulescu (1994) indiquent un épaississement de la croûte à près de 50 km, tandis que Hauser *et al.* (2001) et Landes *et al.* (2004) donnent une épaisseur maximale de 40 à 41 km. Pour notre interprétation, nous avons utilisé le modèle de Hauser *et al.* (2007) comme référence, car il semble être le mieux contraint. Afin de s'adapter à des anomalies à l'air libre et les données géoïde, nous avons dû modéliser un épaississement local sous la chaîne de montagne jusqu'à une épaisseur intermédiaire de 40 km. Dans notre meilleur modèle, nous avons trouvé la croûte la plus fine dans le bassin pannonien à environ 26-27 km, ce qui est similaire à Posgay *et al.* (1995), mais environ 2 km plus épais que Janik *et al.* (2011).

Inversion 3D

Nous avons construit trois différents modèles avec la méthode d'inversion 3D des données de topographie, géoïde et gravité : Un modèle sans données a priori et deux modèles avec deux séries de données a priori différentes, l'un basé sur des données d'épaisseur de croûte sismiques (Janik *et al.*, 2011).et l'autre basé sur le modèle régional d'épaisseur de croûte publié par Csicsay (2010).

La croûte la plus mince a été obtenue sur la base des données a priori de Csicsay (2010). Néanmoins, comme les données a priori limitent fortement la variabilité des paramètres correspondants pendant le processus d'inversion, la carte du Moho est essentiellement le résultat de Csicsay (2010). Cette croûte mince est également prévue par d'utres auteurs (Bielik et al, 2004;. Beranek et Zatopek, 1981; Guterch et al, 1984, 1986;. Čekunov et al, 1988;. Čekunov,

1993;. Posgay et al, . 1995; Tomek et al, 1987, 1989;. Tomek et Hall, 1993; Horváth, 1993; Lenkey, 1999; Janik et al, 2011). La zone la plus surprenante est la partie SE du bassin pannonien, où nous avons obtenu une croûte très mince avec le modèle basé sur la modélisation 1D, mais il y a aussi quelques indications d'une croûte mince dans le modèle basé sur Janik *et al.* (2011). Le bassin de Transylvanie se caractérise par des valeurs d'environ 34 km sur chaque modèle et ce résultat est également en très bonne corrélation avec des travaux précédants (Bielik et al, 2004;. Ioane et Ion, 2005; Csicsay 2010;. Cloetingh et al, 2005; Hauser 2007). Le Sud et l'Est des Carpates présentent des valeurs d'anomalies similaires mais ici, les résultats sont plus similaires entre le modèle basé sur Csicsay et celui sans données a priori. Surtout dans la zone de Vrancea nous avons des valeurs d'environ de 45 kilomètres ce qui est dans la gamme des valeurs de 41 km (Hauser et al, 2001;.. Landes et al, 2004), 47 km (Hauser et al, 2007.) et 50 km (Mocanu et Radulescu, 1994) km voire 53 (Ioane et Ion, 2005). Le plus grand desajustement survient au Nord des Carpates de l'Est dans la plateforme est-européene. Dans cette région, nous observons une importante augmentation de la profondeur du Moho, passant de 39 km à plus de 51 km (Csicsay, 2010). La plateforme Moésienne est caractérisée par des profondeurs du Moho d'environs 33 km. Dans les cartes sans information a priori cette profondeur peut localement même être inférieure à 30 km. Une profondeur d'environ de 33 km est prévue aussi par d'autres auteurs (e.g. Ioane et Ion, 2004; Boykova, 1999).

Les épaisseurs lithosphériques montrent des caractéristiques similaires à celles du Moho. La lithosphère la plus mince est visible dans une zone imprévue, commençant dans la marge sud du bassin de Transylvanie et suivant la limite entre les Carpates du Sud et le bassin pannonien. Ce minimum peut atteindre des valeurs très faibles (localement moins de 60 km, pour un modèle même moins de 40 km, même si ce résultat est certainement dû aux effets de flexure dont les logiciels utilisés ne tiennent pas compte). Habituellement, les publications indiquent dans cette zone des valeurs excédant 120 km (Babuška *et al*., 1988;. Horváth, 1993; Šefara *et al*., 1996;. Lenkey, 1999; Zeyen *et al*., 2002; Dérerová *et al*., 2006). Le bassin pannonien est caractérisé par des épaisseurs lithosphériques dans la gamme de 70 à 110 km, qui localement peuvent être moins de 60 km. Nous avons obtenu cette LAB très mince en utilisant les données de Csicsay comme informations a priori. Néanmoins, une lithosphère ultra-mince d'environ 40 km (Ádám *et al*., 1996) n'a pas été confirmée par notre méthode. Les Carpates de l'Est et du Sud et ses avant-pays immédiats montrent une épaisseur lithosphérique dans la gamme de 140 à 180 km ce qui confirme de srésultats précédents (Babuška *et al*., 1988;. Horváth, 1993; Šefara *et al*.,

1996;. Lenkey, 1999; Zeyen *et al.*, 2002). Cependant ces épaisseurs sont considérablement différentes des résultats obtenus par Dérerová *et al.* (2006). Il y a aussi de petites zones avec une lithosphère encore plus épaisse, principalement dans les Carpates orientales ukrainiennes et dans la zone de Vrancea. Des résultats controverses ont été obtenus aussi dans la plateforme moésienne : tous les modèles montrent une lithosphère mincede 80 km en moyenne, ne dépassant pas 100 km. Cependant, Dérerová *et al.* (2006) présentent une épaisseur de 140 km.

Dans les cartes de l'épaisseur de la croûte, les régions avec une couverture sédimentaire épaisse peuvent être distinguées à première vue. Elles se trouvent surtout dans les domaines de l'avant-pays. Les densités très basses des sédiments diminuent également la densité moyenne de la croûte. Ces régions sont caractérisées par des densités crustales moyennes comprises entre 2780 et 2820 kg/m^3. D'autre part des densités plus faibles se trouvent également dans la région du bassin pannonien. Cependant, ici, à part la couverture sédimentaire, les microplques Alcapa et Tisza-Dacia sont aussi caractérisées par des densités plus faibles de la croûte supérieure et inférieure (Bielik *et al.*, 2004; Dérerová *et al.*, 2006; Csicsay, 2010). Les zones de plateformes sont caractérisées par des valeurs élevées de la densité crustale. Ici, nous avons obtenu les valeurs maximales entre 2890 et 2980 kg/m^3. Ces régions sont généralement très profondément érodées et font partie d'anciennes zones de craton stable qui se caractérisent par des valeurs de densité plus élevées (Csicsay, 2010).

LitMod3D

La dernière tâche de mes études de doctorat était de créer un modèle 3D lithosphérique de la région du bassin des Carpates-Pannonie basé sur la modélisation géophysique 3D (LitMod3D). Nous avons décidé de nous concentrer sur une zone d'étude réduite à la moitié sud du système carpato-pannonien. Nos résultats par rapport aux méthodes précédentes et les documents étudiés montrent que la zone du bassin de Transylvanie est digne d'une enquête plus approfondie. Pendant l'interprétation des données quelques problèmes de programmation et d'untilisation surtout de l'interface graphique se sont découverts qui ont fait le travail plus lent et nous ont forcé de faire un debugging approfondi du logiciel. À l'heure actuelle, la modélisation géophysique-pétrologique en 3D reste donc inachevée.

CONCLUSION

Trois approches d'interprétation géophysique différentes ont été réalisées dans cette étude. Le travail nous permet d'apporter de nouvelles données sur la structure lithosphérique de la région des Carpates et du bassin pannonien. La modélisation conjointe du flux de chaleur de surface, du géoïde, de la gravité et des données topographiques, en utilisant des données sismiques, géologiques comme contraintes, nous a permis d'établir un modèle révisé de la structure lithosphérique de cette région et de ses unités tectoniques avoisinantes. Les transects 2D ainsi que les modèles 1D et 3D montrent de fortes variations dans la zone étudiée. On peut observer sur l'ensemble de nos résultats une augmentation de l'épaisseur de la lithosphère des Carpates de l'Ouest vers les Carpates de l'Est. Une comparaison entre nos résultats et ceux publiés précédamment (Horváth, 1993; Lenkey, 1999) révèle des petites différences générales entre les épaisseurs de la lithosphère sous la plateforme européenne du nord et le bassin pannonien. La grande épaisseur lithosphérique publiée au nord des Carpates de l'Ouest (Horváth, 1993; Lenkey, 1999), en combinaison avec une croûte relativement mince (<40 km), impliquerait une anomalie trop élevé de gravité ou une topographie en dessous du niveau de la mer. Le programme calcule la topographie fondée sur l'hypothèse d'isostasie locale, ce qui constitue une restriction importante. Une partie de la topographie peut être supporté par des contraintes élastiques si la plaque élastique a épaisseur équivalente (EET) trop grande. Il y a deux approches différentes pour résoudre le problème. Dans la modélisation 2D, si nous ne pouvions pas trouver un modèle expliquant tous les données en même temps, nous avons donné la préférence à un bon ajustement des données de gravité et de géoïde et la topographie a été moins bien ajustée. Dans les inversions 1D et 3D, le programme essaie automatiquement de garder les différences entre les données mesurées et calculées aussi bas que possible. Selon les données *a priori* et les options internes choisies, le programme donnera des résultats différents.

Bien que nos résultats diffèrent, ils présentent en général des caractéristiques similaires. Les modèles montrent localement d'importantes différences quantitatives et qualitatives qui pourraient être causés par les différents modèles de départ qui sont basés sur différentes données *a priori*. En tout cas, il faut considérer ce qui est digne de confiance. Dans cette étude, nous avons eu à notre disposition dans certaines zones de très bonnes données sismiques pour le Moho. Il s'agit là surtout du bassin de Pannonie avec les Carpates Occidentales et la zone de Vrancea. Par contre, dans les Carpates du Sud et le bassin gétique où il n'y a guère de données

supplémentaires, nous avons obtenu certains résultats surprenants ou pas bien expliqués. Un autre domaine intéressant est le bassin de Pannonie du Sud-Est. Nos résultats d'inversion 3D montrent une faible profondeur de Moho et une épaisseur de la lithosphère très mince ce qui n'était pas prévu ici. Il serait bien que ces régions seraient l'objet de recherches suplémentaires.

Il est difficile de résoudre quel modèle est le meilleur. Chacun d'entre eux a des côtés forts et faibles. Le modèle sans données *a priori* est très fort dans la région des Carpates Occidentale et Orientale, et surtout dans la zone de Vrancea. D'un autre côté, il ne correspond pas aux modèles lithosphériques publiés antérieurement dans le bassin de Pannonie, dans lequel les données sismiques de bonne qualité existent. De plus, il montre des caractéristiques surprenantes dans la partie sud-est du bassin de Pannonie. Si dans d'autres régions, la flexion élastique de la lithosphère peut avoir un effet indésirable sur les résultats, dans cette région assez large nous ne pouvons pas évoquer cet effet pour expliquer l'amincissement lithosphérique obtenu. Dans le cas des modèles de la densité, le modèle sans données *a priori* donne des résultats géologiquement acceptables, les densités étant plus realistes que dans les autres modèles.

Bien qu'un modèle basé sur la modélisation 3D intégrée (LitMod3D) était l'un de mes objectifs, il n'était pas possible de terminer cette tâche, puisque nous avons dû passer trop de temps à déboguer et tester le programme. À mon avis, le programme LitEdit est toujours une version bêta, il devrait être plus facile à utiliser, car le processus d'entrer des paramètres d'une couche exige beaucoup de patience de l'utilisateur. D'autre part, je pense que une fois le programme sera finalisé, il devient un engin fantastique et puissant pour l'étude géophysique de la lithosphère.