



Academia Romana

Institutul de Geodinamica "Sabba S. Ștefanescu"
Laboratorul Dinamica Globului Terestru

*Str. Jean-Louis Calderon, Nr. 19-21, București-37, Romania, R-020032,
fax: (4021) 317.2120, tel. (4021) 317.2126; e-mail: inst_geodin@geodin.ro
<http://www.geodin.ro/~prezentare/>*

DIRECTOR,

Dr. Crișan DEMETRESCU

Membru corespondent al Academiei Romane



UNIUNEA EUROPEANĂ



GUVERNUL ROMÂNIEI



Instrumente Structurale
2007 - 2013

Programul Operațional Sectorial Creșterea Competitivității Economice

Axa prioritara 2: Competitivitate prin Cercetare, Dezvoltare Tehnologica și Inovare

Operațiunea: O.2.1.2 „Proiecte CD de inalt nivel științific la care vor participa specialiști din strainatate”

Proiect: Infrastructura cibernetica pentru studii geodinamice relaționate cu zona seismogena Vrancea: ID-593, cod SMIS-CSNR 12499

Etaapa 3: Construirea unor modele geodinamice tridimensionale de inalta rezolutie cu ajutorul sistemului HPCC/HPVC/GeoWall. Rularea modelelor tridimensionale si validarea

Perioada: 18 iunie 2012-17 octombrie 2013

STUDIU

PRIVIND PREGATIREA UNEI SERII DE APLICATII ONLINE PENTRU VIZUALIZAREA SI INTEROGAREA IN TIMP REAL A MODELELOR 3D PE PORTALUL WEB

Director de proiect,

Dr. Vlad Constantin Manea

A U T O R I :

Dr. Vlad Constantin Manea

Dr. Marina Manea

CUPRINS:

1. Introducere	1
2. Aplicatii @nline: GEOMODELS	2
2.1. Aplicatia GEOMODELS - PlumeIMPACT	6
2.2. Aplicatia GEOMODELS - Collision&Breakoff	27
2.3. Aplicatia GEOMODELS - GravINSTAB	36
2.4. Aplicatia GEOMODELS - SlabDetachment	40
3. Referinte bibliografice	46

1. INTRODUCERE

Scopul principal al proiectului CYBERDYN este construirea unei infrastructuri cibernetice in cadrul Institutului de Geodinamica al Academiei Romane din Bucuresti, Romania, pentru studierea evolutiei geodinamice pe termen lung a zonei seismogene active Vrancea. Aceasta infrastructura cibernetica este formata dintr-un sistem HPCC (High Performance Computing Cluster – Grup de Servere pentru Calcule de Inalta Peformanta), un sistem HPVC (High Performance Visualization Cluster – Grup de Servere pentru Vizualizare de Inalta Peformanta) si, additional, un sistem de Vizualizare Stereo in 3D (GeoWall).

Asa cum s-a mentionat in cererea de Finantare, noua infrastructura cibernetica va ajuta la crearea unui corp de cercetatori format din experti cu inalta pregatire obtinuti prin antrenarea tinerilor oameni de stiinta in campul geodinamicii computationale, permitand generarea primului centru de excelenta in domeniu din Romania. Activitatea acestui centru de excelenta se va extinde si dupa finalizarea ultimei etape a proiectului prin formarea tinerilor specialisti si prin participarea in proiecte nationale/internationale bazata pe capacitatea si performanta oferite de o asemenea tehnologie.

In aceasta ultima faza a proiectului grupul de cercetare CyberDYN s-a concentrat pe rularea/vizualizarea si validarea a trei modele numerice care au fost prevazute initial in cererea de finantare. Adicional, s-a inclus in acest studiu un model suplimentar de instabilitate gravitacionala, acesta fiind prevazut ulterior printr-un act aditional incheiat la sfarsitul anului 2012. Ca atare, in acest studiu s-au folosit rezultatele modelarii numerice a celor patru (4) scenarii propuse, pentru realizarea unei serii de aplicatii online (acestea formand fiind parte a unui pachet numit GEOMODELS), dupa cum urmeaza:

- a) - PlumeIMPACT - Delaminare litosferica prin impactul cu o anomalie termo-chimica;
- b) - Collision&Breakoff - Coliziune continentală uramata de rupere de palca (sau slab break-off);
- c) - GravINSTAB - Instabilitate gravitacionala;
- d) - SlabDetachment - Subductia unei placi oceanice urmata de coliziune continentală.

Una dintre modalitatile de prezentare a rezultatelor cercetarii in cadrul site-ului o reprezinta aplicatiile prin intermediul carora se pot vizualiza interactiv modelele geodinamice, GEOMODELS, prin intermediul portalului web al proiectului. Aceste modele sunt direct legate de cele patru (4) scenarii considerate pentru realizarea modelarilor numerice. Realizarea unor modele numerice pe baza acestor scenarii si vizualizarea lor interactiva reprezinta unul dintre obiectivele proiectului Cybedyn specificat in Cererea de Finantare. In cele ce urmeaza se va prezenta aceasta aplicatie atat din punct de vedere al conceptiei cat si ca modalitate de accesare.

2. APLICATII ONLINE: GEOMODELS

Cu toate ca, prin natura sa, proiectul are legatura cu multe alte cercetari anterioare sau in curs, el este un concept independent fata de acestea, avand obiective specifice, originale. Zona seismogenica Vrancea este una din cele mai active zone seismice din Europa si in ultimii ani, grupuri de cercetare nationale si internationale au inceput sa-si concentreze eforturile in directia intelegerii dinamicii si comportamentului acestei regiuni unice. Au fost propuse o serie de scenarii alternative contrastante pentru conditiile geodinamice din zona Vrancea: subductia unei placi oceanice urmata de ruperea placii subduse, subductia unei placii oceanice si sfasierea ei laterala, delaminarea litosferei continentale sau o jonctiune tripla instabila. In orice caz, nu s-a ajuns la un consens asupra unui model referitor la originea si regimul dinamic al zonei seismogene Vrancea.

Originea zonei seismogene din Vrancea este inca un subiect in dezbatere. Au fost propuse cateva modele geodinamice si unele dintre ele au fost de asemenea studiate prin metode numerice (Ismail-Zadeh et al., 1999; Cleetingh et al., 2004; Ismail-Zadeh et al., 2008; Lorinczi si Hooseman, 2008). Ruperea si separarea placii subduse (Girbacea si Frish, 1988; Wortel si Spakman, 2000), delaminarea (Enescu, 1992; Gwirtzman, 2002; Knapp et al., 2005).

Una dintre ipotezele privind originea zonei seismogene Vrancea, propusa si in cererea de finantare a proiectului CyberDyn, este aceea a delaminarii litosferice (Knapp et al., 2005), conform careia, aceasta delaminare litosferica este posibil sa se produca, ca urmare a unui impact intre o anomalie termica (sau termo-chimica) cu litosfera in regiunea in care cele trei blocuri litosferice cu grosimi diferite se intalnesc in zona Vrancea. Aceasta situatie particulara ar duce la localizarea delaminarii in regiunea Vrancea (Figura 1).

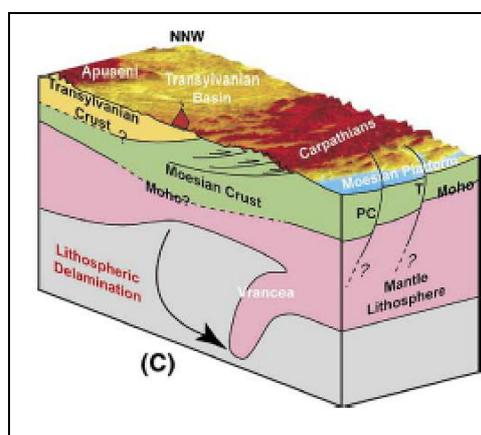


Figura 1. Scenariu de delaminare litosferica ca origine geodinamica a zonei seismogene Vrancea propus de Knapp et al. (2005).

Pe langa ipoteza mai sus elaborata, s-a propus si scenariul de subductie a unei placi oceanice (*Knapp et al., 2005*). Aceasta este si una dintre ipotezele privind originea zonei seismogene Vrancea, propusa si in cererea de finantare a proiectului CyberDyn (Figura 2). Scopul acestui model este de a vedea in ce conditii (ce parametri de subductie) modelul final satisface observatiile din zona Vrancea, ca de exemplu inclinarea corpului seismogen, sau existenta unei prisme de sedimente de mari dimensiuni.

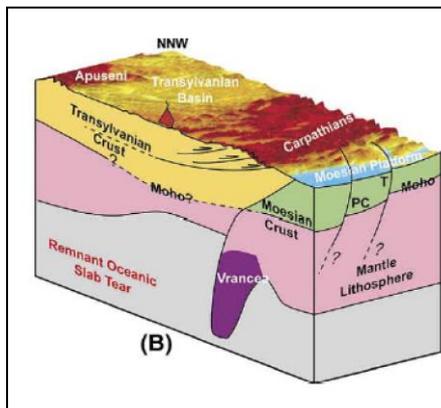


Figura 2. Scenariu de subductie a unei placi oceanice ca origine geodinamica a zonei seismogene Vrancea propus de *Knapp et al. (2005)*.

O ipoteza mai recenta in ceea ce priveste originea zonei seismogene Vrancea, si anume instabilitatea gravitacionala a fost propusa de catre *Lorinczi and Houseman, 2009* si *Houseman and Gemmer, 2007*. Este cunoscut faptul ca mantaua litosferica este mai densa decat astenosfera in cazul in care este incalzita la aceeasi temperatura si ca atare devine instabila din punct de vedere gravitacional. In cazul in care intervine o compresiune tectonica orizontala intre doua, sau mai multe blocuri tectonice, asa cum este cazul zonei seismogene Vrancea, instabilitatea gravitacionala poate sa favorizeze ingrosarea litosferica. In acelasi timp, partea inferioara a crustei continentale se poate eclogitiza declasand astfel instabilitatea gravitacionala. In Figura 3 prezentam modelul conceptual al instabilitatii gravitacionale (*Molnar et al., 1998*).

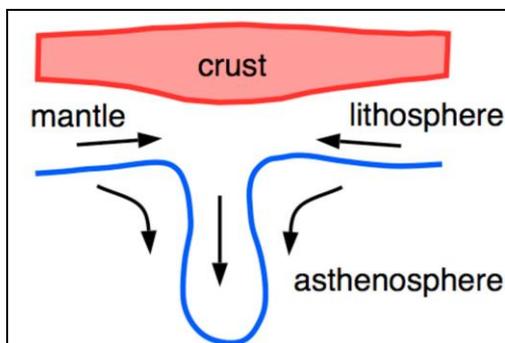


Figura 3. Scenariu general de instabilitate gravitacionala (*Molnar et al., 1998*) propus in acest studiu ca origine geodinamica a zonei seismogene Vrancea.

Pe langa ipoteza delaminarii ca explicatie a originii geodinamice a zonei Vrancea, s-a propus si scenariul de subductie urmat de rupere, sau mai bine zis, sfasiere laterala, de placa oceanica (Knapp et al., 2005). Aceasta este si una dintre ipotezele privind originea zonei seismogene Vrancea, propusa si in cererea de finantare a proiectului CyberDyn (Figura 4).

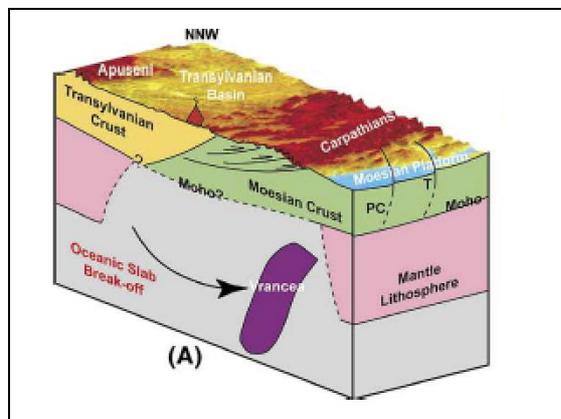


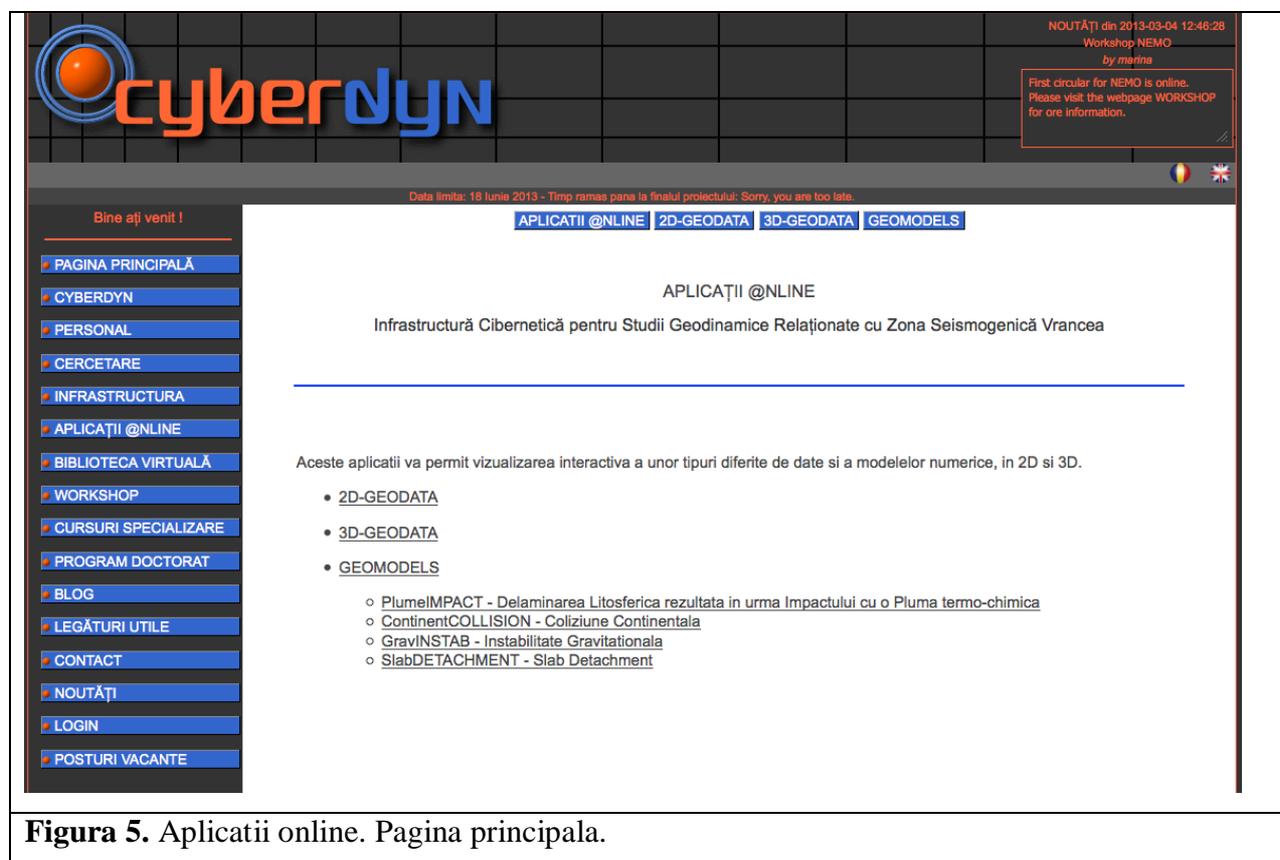
Figura 4. Scenariu de rupere de placa (slab break-off) ca origine geodinamica a zonei seismogene Vrancea propus de Knapp et al. (2005).

Pornind de la aceste ipoteze s-au realizat modele numerice pe HPCC CyberDyn, cele mai bune rezultate fiind alese pentru a fi prezentate pe site-ul proiectului. Scopul aplicatiilor realizate il reprezinta vizualizarea online a rezultatelor modelarii numerice pe cluster, a calculelor numerice cu rezolutie mica, sau a unor calcule numerice teoretice rulate in timp real pe server, asa cum se prevede in Cererea de Finantare.

Pe pagina principala **Aplicatii @nline** (<http://cyberdyn.geodin.ro/applications/applications.php>) se pot accesa cele trei aplicatii existente (2D-Geodata, 3D-Geodata si GEOMODELS) cu mentiunea ca aceste aplicatii sunt intr-un process continuu de generare si de asemenea ca dezvoltarea acestor aplicatii se va intinde pe toata durata proiectului, modelele prezentate imbunatatindu-se cu fiecare noua rulare cu rezultate pozitive (Figura 5).

Aplicatia online noua pe care o vom prezenta in acest raport este GEOMODELS, care este gandita ca o umbrela pentru alte aplicatii legate de modelarea numerica a scenariilor propuse in proiect. Realizarea unor modele numerice pe baza acestor scenarii si vizualizarea lor interactiva reprezinta unul dintre obiectivele proiectului Cyberdyn specificat in Cererea de Finantare. Aplicatia GEOMODELS contine subaplicatiile: PlumeIMPACT (Delaminarea litosferica rezultata in urma impactului cu o pluma termo-chimica), COLLISION&BREAKOFF (Coliziune continentală si rupere de slab), GravINSTAB (Instabilitate gravitacionala) si SlabDETACHMENT (Rupere si detasare de slab). Toate modelele si animatiile prezentate pe site reprezinta modele numerice rulate pe HPCC-ul CYBERDYN si pentru realizarea lor sunt necesare luni de zile de rulare, pentru testarea sistematica a tuturor parametrilor ce se iau in considerare in construirea unor astfel de modele.

OBS: Toate modelele prezentate nu sunt inca publicate, ele facand subiectul unui articol in curs de preparare care va fi submis in curand spre evaluare la o revista stiintifica de impact cu peer-review.



The screenshot shows the main page of the Cyberdyn website. At the top left is the Cyberdyn logo, which consists of a stylized orange and blue globe next to the text 'cyberdyn'. In the top right corner, there is a notification box with the text: 'NOUȚĂȚI din 2013-03-04 12:48:28 Workshop NEMO by maria. First circular for NEMO is online. Please visit the webpage WORKSHOP for ore information.' Below the logo, a dark banner contains the text: 'Data limita: 18 Iunie 2013 - Timp ramas pana la finalul proiectului: Sorry, you are too late.' Below this banner is a navigation bar with four buttons: 'APLICATII @NLINE', '2D-GEODATA', '3D-GEODATA', and 'GEOMODELS'. The main content area is titled 'APLICAȚII @NLINE' and features the subtitle 'Infrastructură Cibernetică pentru Studii Geodinamice Relaționate cu Zona Seismogenică Vrancea'. A horizontal line separates the title from the main text, which states: 'Aceste aplicatii va permit vizualizarea interactiva a unor tipuri diferite de date si a modelelor numerice, in 2D si 3D.' Below this text is a bulleted list of application categories: '2D-GEODATA', '3D-GEODATA', and 'GEOMODELS'. Under 'GEOMODELS', there are four sub-items: 'PlumeIMPACT - Delaminarea Litosferica rezultata in urma Impactului cu o Pluma termo-chimica', 'ContinentCOLLISION - Coliziune Continentala', 'GravINSTAB - Instabilitate Gravitationala', and 'SlabDETACHMENT - Slab Detachment'. On the left side of the page, there is a vertical navigation menu with 15 items, each with a blue arrow icon: 'Bine ați venit !', 'PAGINA PRINCIPALĂ', 'CYBERDYN', 'PERSONAL', 'CERCETARE', 'INFRASTRUCTURA', 'APLICAȚII @NLINE', 'BIBLIOTECA VIRTUALĂ', 'WORKSHOP', 'CURSURI SPECIALIZARE', 'PROGRAM DOCTORAT', 'BLOG', 'LEGĂTURI UTILE', 'CONTACT', 'NOUȚĂȚI', 'LOGIN', and 'POSTURI VACANTE'.

Figura 5. Aplicatii online. Pagina principala.

2.1. APLICATIA GEOMODELS - PlumeIMPACT

Delaminarea litosferica rezultata in urma impactului un o pluma termo-chimica.

Pachetul de elemente finite instalat pe sistemul HPCC si care este folosit pentru realizarea modelelor numerice este un pachet open source, CitComS, creat in CALTECH (www.geodynamics.com). Acesta este un cod paralel avansat ce se scaleaza foarte bine pe sute de procesoare. Pentru simularile numerice aplicate pentru zona seismogenica Vrancea, am introdus scenarii de paleoreconstructii pentru conditiile la limita superioara a modelelor. Pozitia si viteza placilor tectonice sunt reimprospatate la fiecare milion de ani.

Pentru realizarea unor modele in 3D folosind structura cibernetica disponibila, avem nevoie de stabilirea conditiilor la frontiera, pentru restrangerea numarului variabilelor ce intra in modelare. Pentru aceasta, avem nevoie de parametrii cunoscuti care sa intre in ecuatiile care guverneaza modelarea numerica in 3D. Acesti parametri sunt extrasi din datele existente in format liber pe internet, sau in literatura (figura 6).

Setarea modelului consta in generarea unei cutii 3D in care dimensiunile sunt de $57^\circ \times 57^\circ \times 1900\text{km}$. Grosimea litosferei variaza intre 100 si 150-200 km. Geometria initiala a capului plumului variaza intre 300 si 500 km in diametru si este completata de 1 milion de trasori. De asemenea, un strat de trasori cu o grosime de 50 de km acopera fundul cutiei. Conditia de frontiera la suprafata este fie alunecare libera (free-slip), fie cinematica (2cm/yr). Toate frontierele laterale sunt reflectoare. Fata inferioara are impusa o viteza nula.

Parametrii variabili folositi pentru rulari sunt: diametrul capului plumului termochimic ce impacteaza litosfera continentală (in km); excesul initial de temperatura (in $^\circ\text{C}$); excesul de densitate (in kg/m^3); grosimea litosferei vechi (in km); vascozitatea litosferei (in Pa s) si tipul de miscare considerata pe suprafata superioara a volumului studiat (figura 6). Dupa analizarea tuturor combinatiilor posibile au reiesit 57 de modele viabile care pot fi vizualizate pe o pagina separata (MODELE/MODELS), alegand din tabel numele modelului dorit, in functie de parametrii folositi (figura 7).



NOUTĂȚI din 2013-03-04 12:46:28
Workshop NEMO
by marina

First circular for NEMO is online.
Please visit the webpage WORKSHOP
for ore information.

Bine ați venit !

- PAGINA PRINCIPALĂ
- CYBERDYN
- PERSONAL
- CERCETARE
- INFRASTRUCTURA
- APLICAȚII @NLINE
- BIBLIOTECA VIRTUALĂ
- WORKSHOP
- CURSURI SPECIALIZARE
- PROGRAM DOCTORAT
- BLOG
- LEGĂTURI UTILE
- CONTACT
- NOUTĂȚI
- LOGIN
- POSTURI VACANTE

Vizitator nr. 0
din 14/10/2010

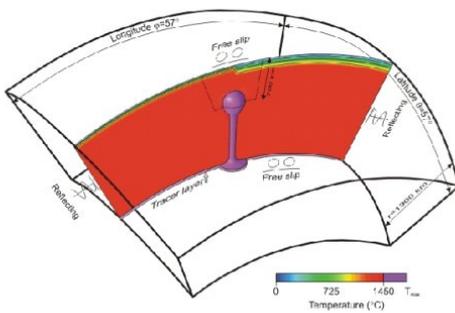
Data limita: 18 Iunie 2013 - Timp ramas pana la finalul proiectului: Sorry, you are too late.

[APLICAȚII @NLINE](#)
[2D-GEODATA](#)
[3D-GEODATA](#)
[GEOMODELS](#)
[PlumeIMPACT](#)
[COLLISION&BREAKOFF](#)
[GravINSTAB](#)
[SlabDETACHMENT](#)
[Modele](#)
[Interactive3D](#)

APLICAȚII @NLINE:::GEOMODELS:::PlumeIMPACT

Infrastructură Cibernetică pentru Studii Geodinamice Relaționate cu Zona Seismogenică Vrancea

PlumeIMPACT - Delaminarea litosferică rezultată în urma impactului cu o pluma termo-chimică



Dimensiunile cutiei 3D sunt: 57° x 57° x 1900 km. Grosimea litosferei variază între 100 și 150-200 km. Geometria inițială a capului plumei variază între 300 și 500 km diametru și este completată de 1 milion de trasori. De asemenea, un strat de trasori cu o grosime de 50 km acoperă fundul cutiei. Condiția de frontieră la suprafață este fie alunecare liberă fie cinematică (2 cm/yr). Toate frontierele laterale sunt reflectoare. Fata inferioară are impusă o viteză nulă. Mai jos puteți vedea rezultatele modelării în cazul schimbării parametrilor.

0 725 1450 T_{max}
Temperature (°C)

Figura 6. Aplicatii online. PlumeIMPACT.



NOUTĂȚI din 2013-03-04 12:46:28
Workshop NEMO
by marina

First circular for NEMO is online.
Please visit the webpage WORKSHOP
for ore information.

Bine ați venit !

- PAGINA PRINCIPALĂ
- CYBERDYN
- PERSONAL
- CERCETARE
- INFRASTRUCTURA
- APLICAȚII @NLINE
- BIBLIOTECA VIRTUALĂ
- WORKSHOP
- CURSURI SPECIALIZARE
- PROGRAM DOCTORAT
- BLOG
- LEGĂTURI UTILE
- CONTACT
- NOUTĂȚI
- LOGIN
- POSTURI VACANTE

Vizitator nr. 0
din 14/10/2010

Vizitatori @nline: 2
Membri @nline: 0

Data limita: 18 Iunie 2013 - Timp ramas pana la finalul proiectului: Sorry, you are too late.

[APLICAȚII @NLINE](#)
[2D-GEODATA](#)
[3D-GEODATA](#)
[GEOMODELS](#)
[PlumeIMPACT](#)
[COLLISION&BREAKOFF](#)
[GravINSTAB](#)
[SlabDETACHMENT](#)
[Modele](#)
[Interactive3D](#)

APLICAȚII @NLINE:::GEOMODELS:::PlumeIMPACT:::MODELE

Infrastructură Cibernetică pentru Studii Geodinamice Relaționate cu Zona Seismogenică Vrancea

Numarul de cazuri analizate: 57

Puteți alege un Nume de Model din tabel.

NUME MODEL	Capul plumei (Diametrul initial-km)	Excesul initial de Temperature (°C)	Excesul de densitate (kg/m ³)	Grosimea litosferei vechi (km)	Viscozitatea litosferei (Pa s)	Top BC
A_1	300	150	30	200	10 ²³	free_slip
A_2	400	250	30	200	10 ²³	free_slip
A_3	500	300	30	200	10 ²³	free_slip
B_1	300	150	30	150	10 ²³	free_slip
B_2	400	250	30	150	10 ²³	free_slip
B_3	500	300	30	150	10 ²³	free_slip
C_1	300	150	50	200	10 ²³	free_slip
C_2	500	300	50	200	10 ²³	free_slip

Figura 7. Aplicatii online. PlumeIMPACT.

In momentul accesarii Numelui Modelului, o fereastră nouă se deschide (figura 8) și aici, utilizatorul poate vizualiza modelul numeric de delaminare litosferică în urma impactului cu o pluma termo-chimică, pentru diferiți parametri, variația grosimii litosferei continentale în timp, variația adâncimii litosferei în timp (Figura 8), variația în timp a temperaturii pentru trei profile prin capul plumului (stânga, centrul și dreapta plumului) în raport cu curba dry-solidus (figura 9), diferite slice-uri de timp pentru model ales, începând cu momentul 0 Ma până în momentul producerii delaminării (figurile 10-30), precum și o animație GIF în care este prezentat procesul de ridicare al plumului și de delaminare a litosferei continentale în urma impactului cu acesta, și evoluția temperaturii în raport cu curba dry-solidus pentru diferite intervale de timp (Figura 31).

În cele ce urmează (Figurile 8-31) vom prezenta rezultatele pentru modelul A_1, în care parametrii folosiți sunt:

- diametrul inițial al capului plumului termo-chimic: 300 km;
- excesul inițial de temperatură 150 °C;
- excesul de densitate 30 kg/m³;
- grosimea litosferei vechi 200 km;
- vascozitatea litosferei 10²³ Pa s;
- tipul de mișcare considerată pe suprafața superioară a volumului studiat: free-slip

Toate graficele și animațiile sunt realizate cu ajutorul pachetului de programe open-source, GMT, de la Universitatea din Hawaii, USA.

Bine ai venit!

- [PAGINA PRINCIPALĂ](#)
- [CYBERDYN](#)
- [PERSONAL](#)
- [CERCETARE](#)
- [INFRASTRUCTURA](#)
- [APLICAȚII @NLINE](#)
- [BIBLIOTECA VIRTUALĂ](#)
- [WORKSHOP](#)
- [CURSURI SPECIALIZARE](#)
- [PROGRAM DOCTORAT](#)
- [BLOG](#)
- [LEGĂTURI UTILE](#)
- [CONTACT](#)
- [NOUȚĂȚI](#)
- [LOGIN](#)
- [POSTURI VACANTE](#)

Vizitator nr: 76655

din 14/10/2010

Vizitatori @online: 3

Membrii @online: 0

Ultima actualizare:

11/30/12 09:24

APLICAȚII @NLINE...: GEOMODELS...: PlumeIMPACT

Infrastructură Cibernetică pentru Studii Geodinamice Relaționate cu Zona Seismogenică Vrancea

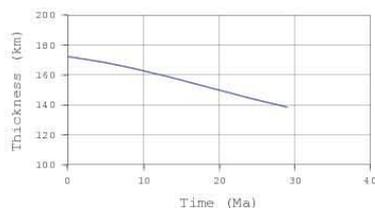
PlumeIMPACT - Delaminarea litosferică rezultată în urma impactului cu o pluma termo-chimică

Numele Modelului A_1

[VIZUALIZARE ANIMATIE GIF](#)

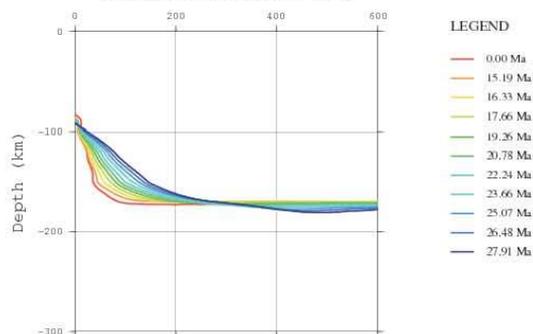
Diametrul Initial al capului plumului: **300** (km) | Excesul Initial de Temperatura: **150** (°C) | Excesul de densitate: **30** (kg/m³) |
Grosimea litosferei vechi: **200** (km) | Viscositatea litosferei: **10²³** Pa s | Top BC: **free_slip**

Cratonic Lithosphere Thickness Variation in Time



[Înapoi la Tabelul Principal al Modelelor](#)

Lithosphere Thickness Variation in Time
Distance from Suture (km)



[Înapoi la Tabelul Principal al Modelelor](#)

Figura 8. Aplicații online. PlumeIMPACT.

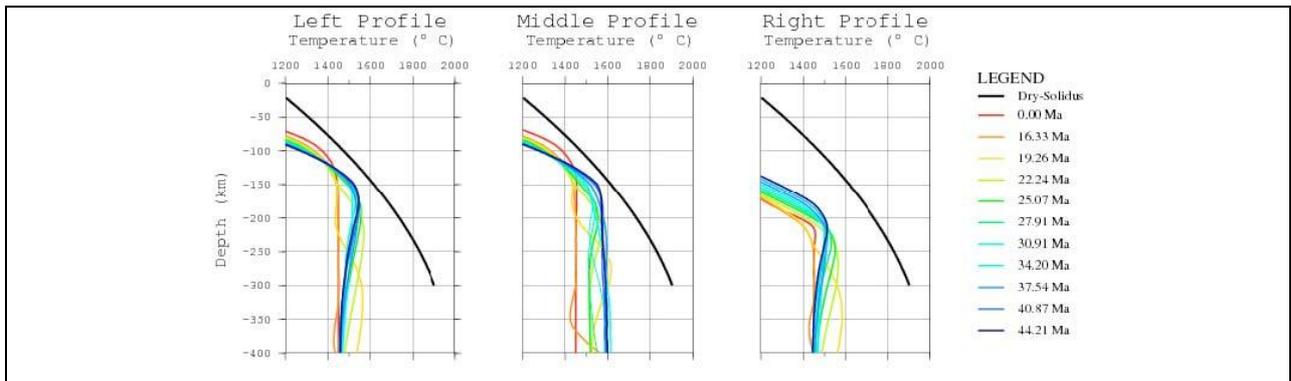


Figura 9. Aplicatii online. PlumeIMPACT.

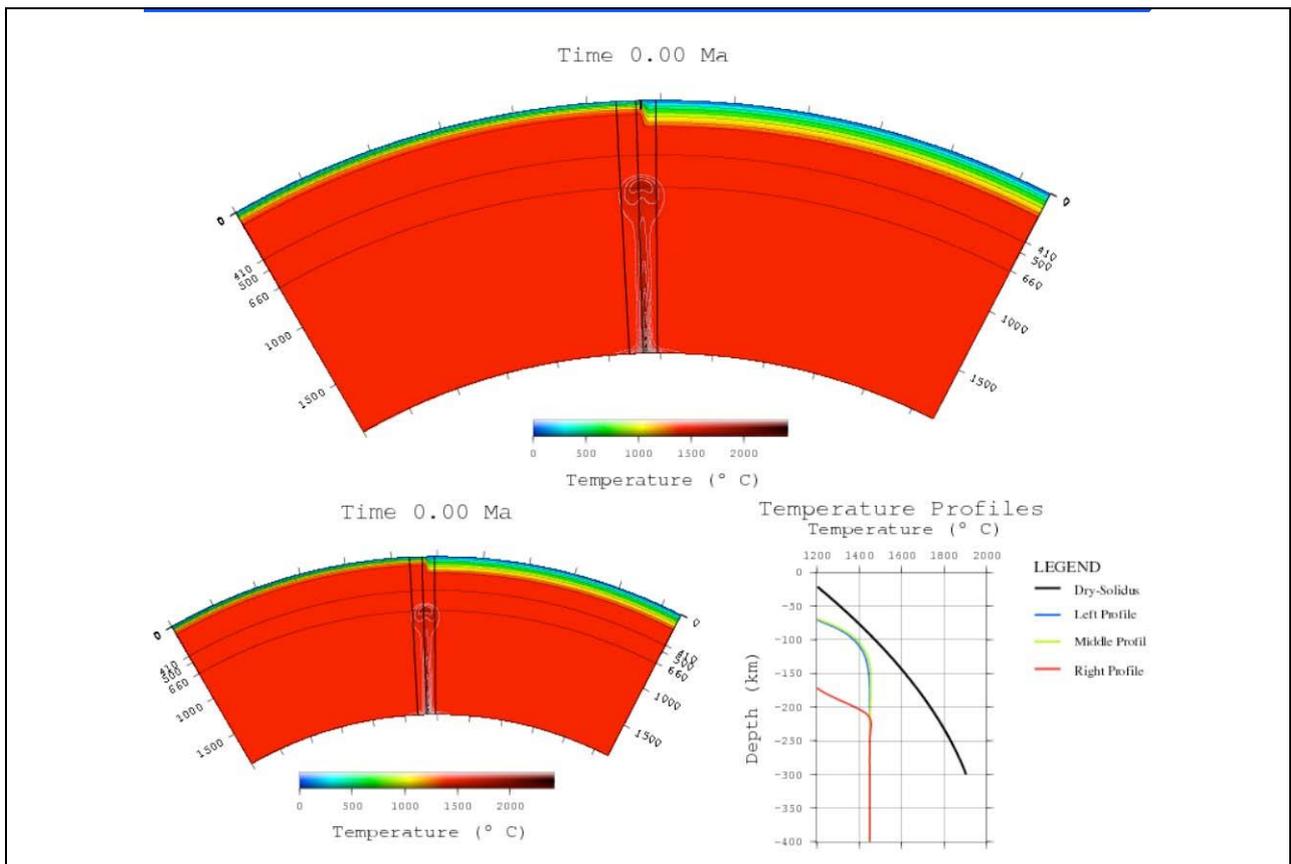


Figura 10. Aplicatii online. PlumeIMPACT: Model numeric - Pas de timp: 0.00 Ma

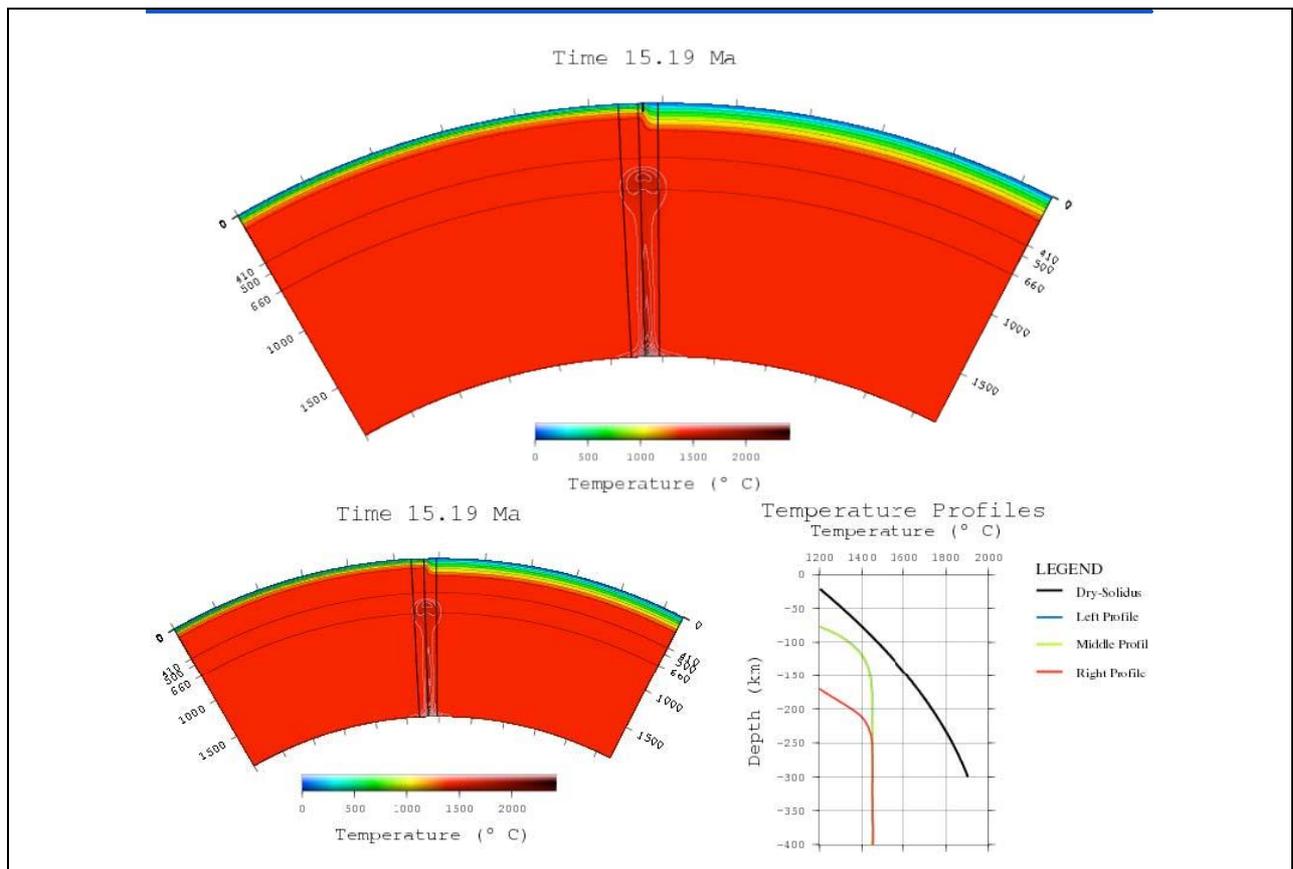


Figura 11. Aplicatii online. PlumeIMPACT: Model numeric - Pas de timp: 15.19 Ma

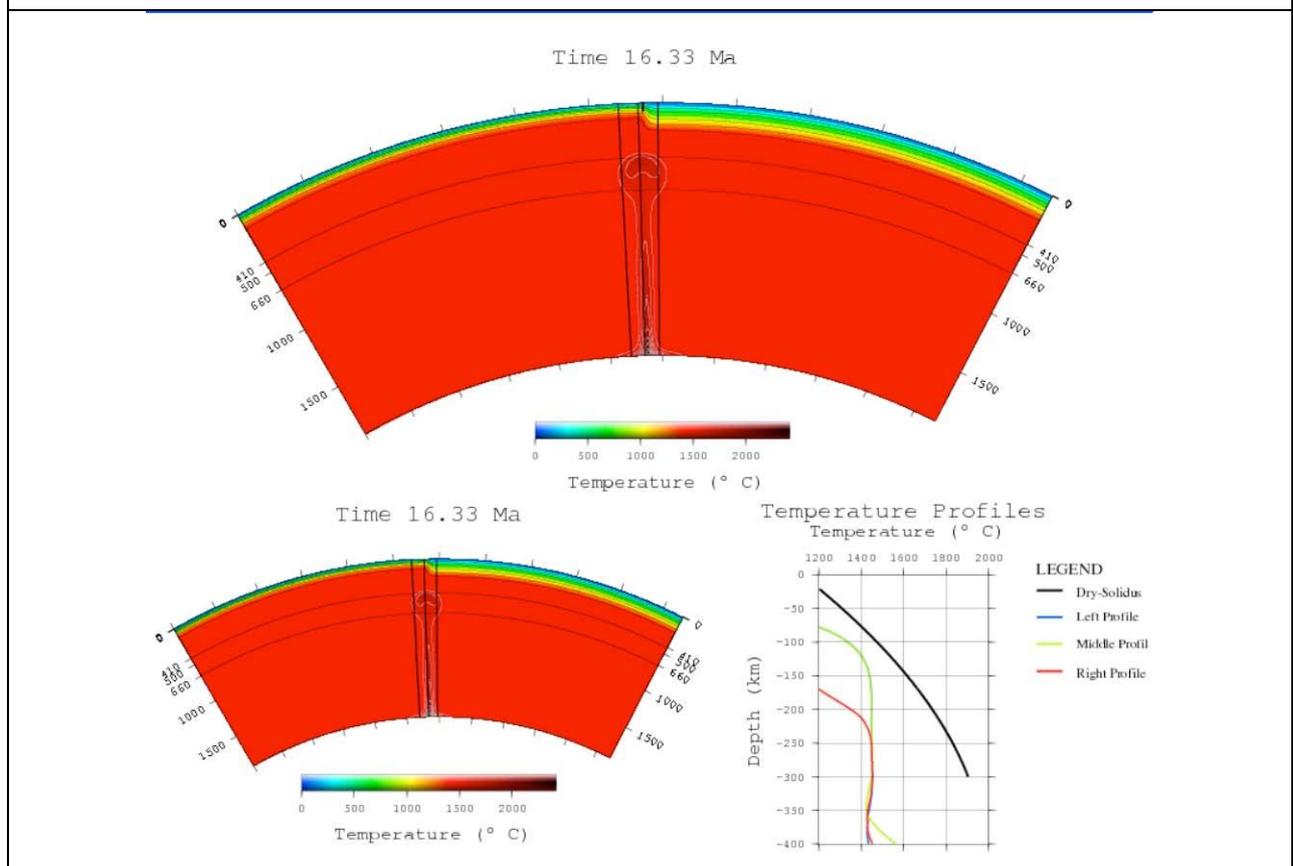


Figura 12. Aplicatii online. PlumeIMPACT: Model numeric - Pas de timp: 16.33Ma

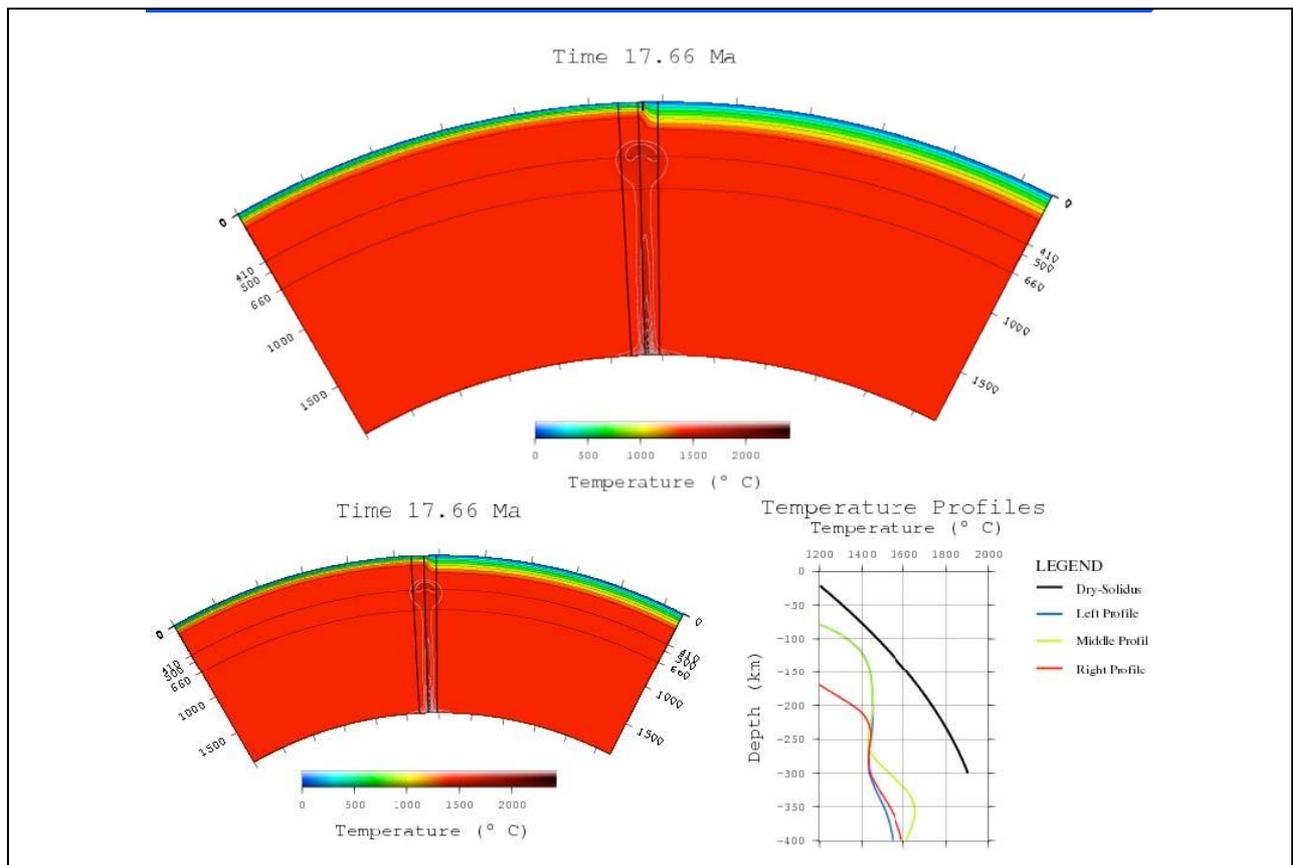


Figura 13. Aplicatii online. PlumeIMPACT: Model numeric - Pas de timp: 17.66 Ma

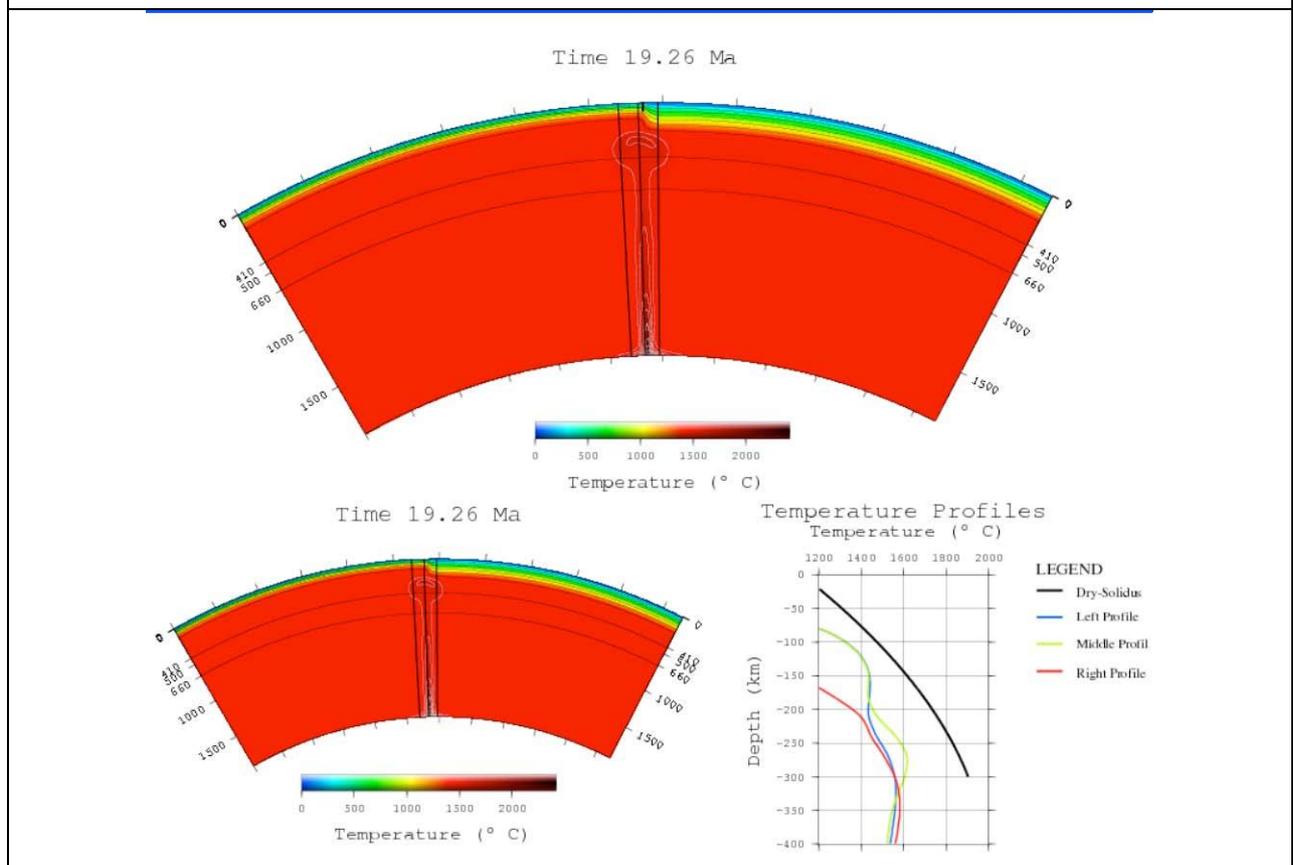


Figura 14. Aplicatii online. PlumeIMPACT: Model numeric - Pas de timp: 19.26 Ma

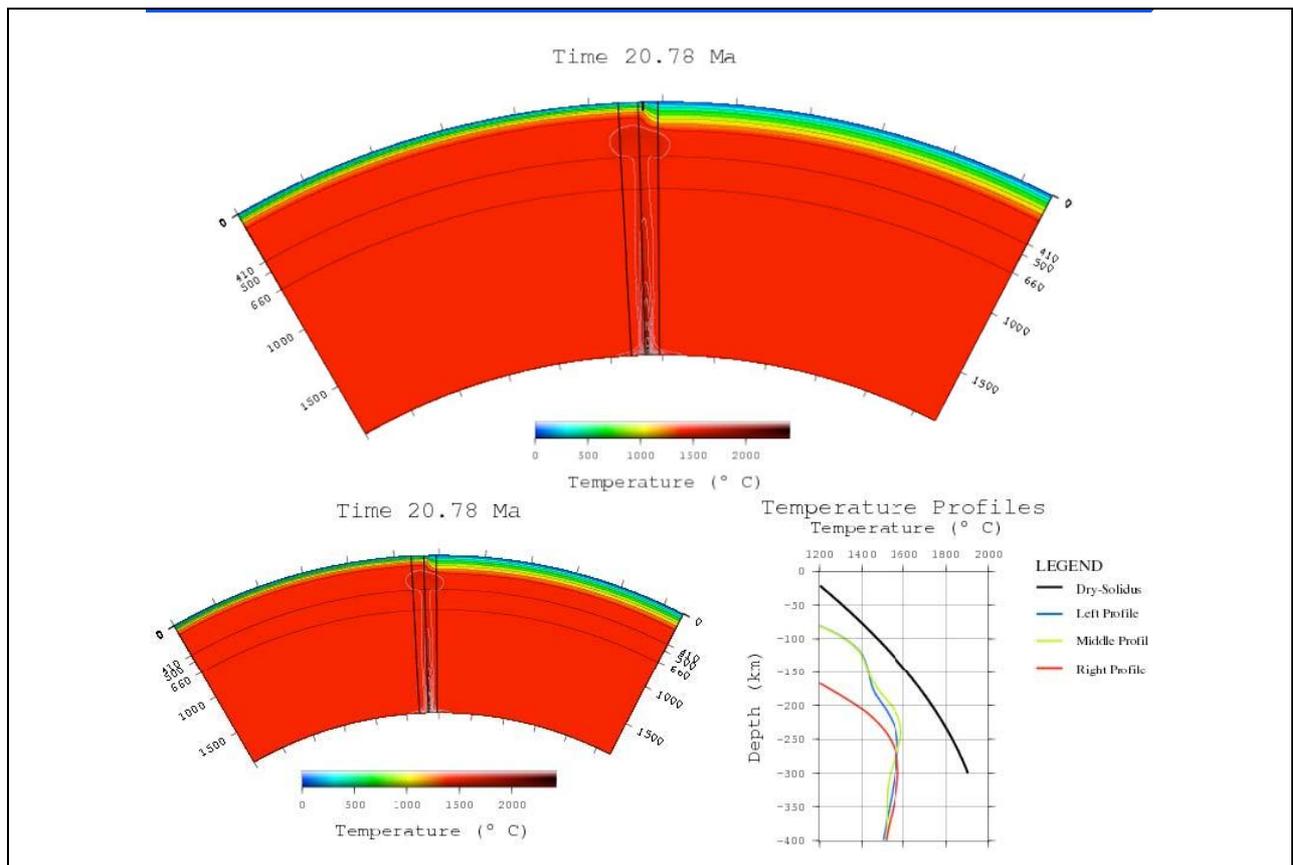


Figura 15. Aplicatii online. PlumeIMPACT: Model numeric - Pas de timp: 20.78 Ma

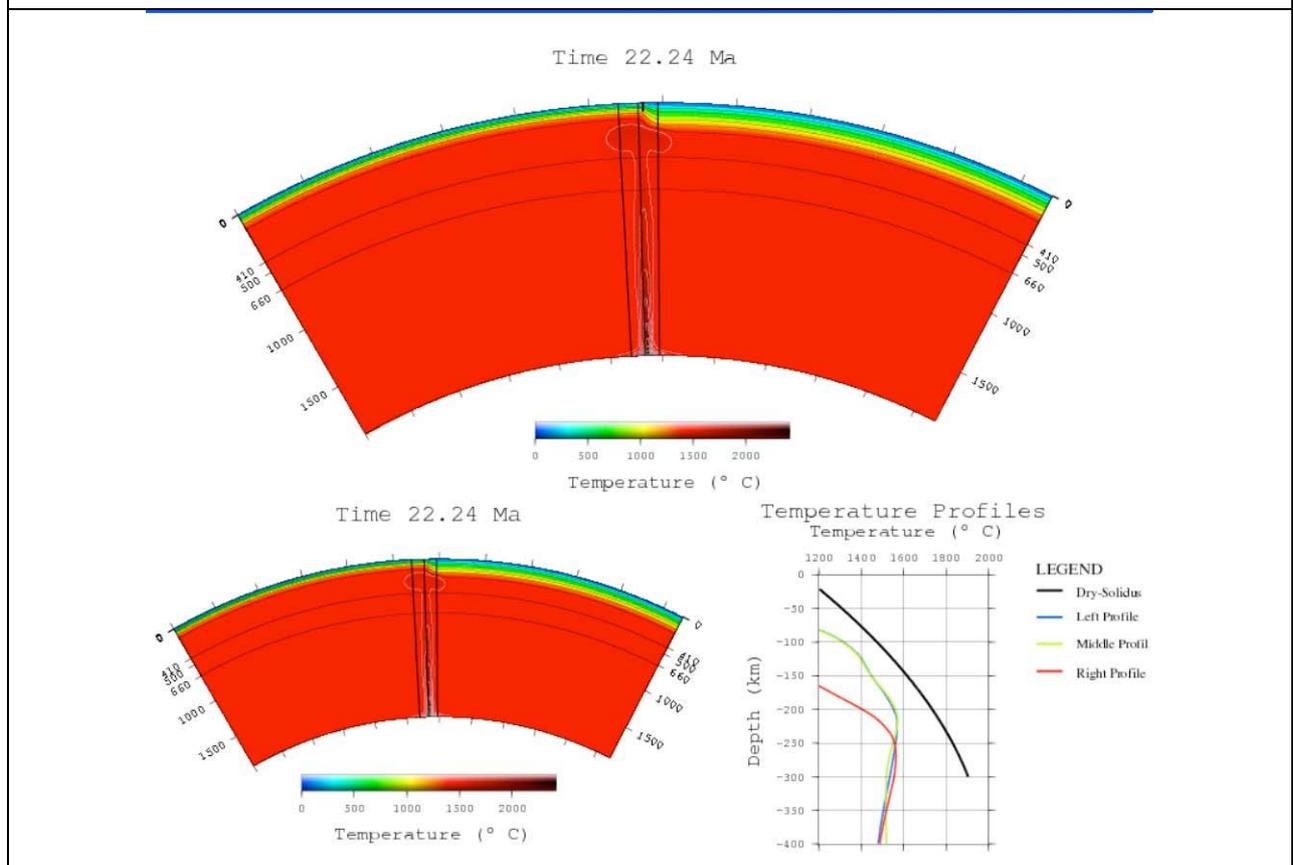


Figura 16. Aplicatii online. PlumeIMPACT: Model numeric - Pas de timp: 22.24 Ma

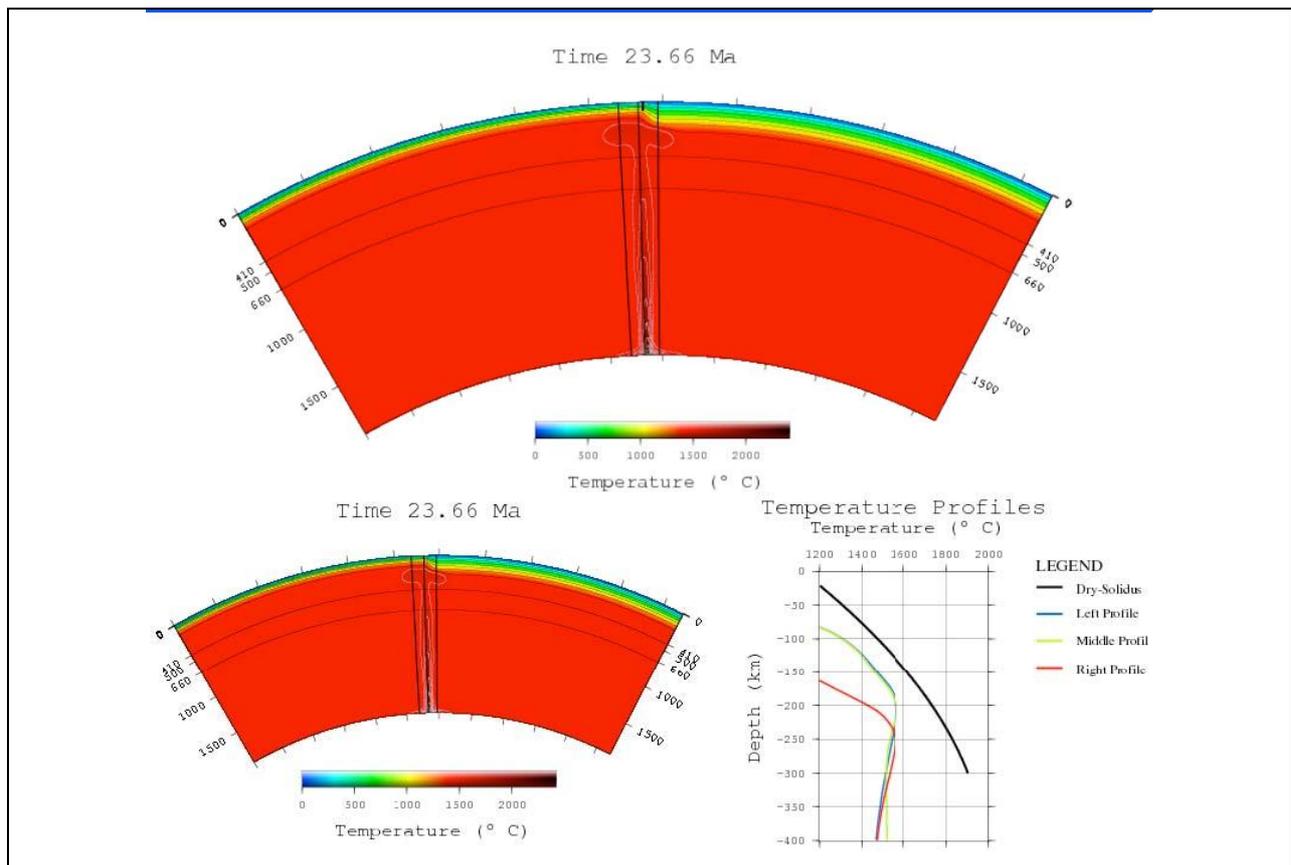


Figura 17. Aplicatii online. PlumeIMPACT: Model numeric - Pas de timp: 23.66 Ma

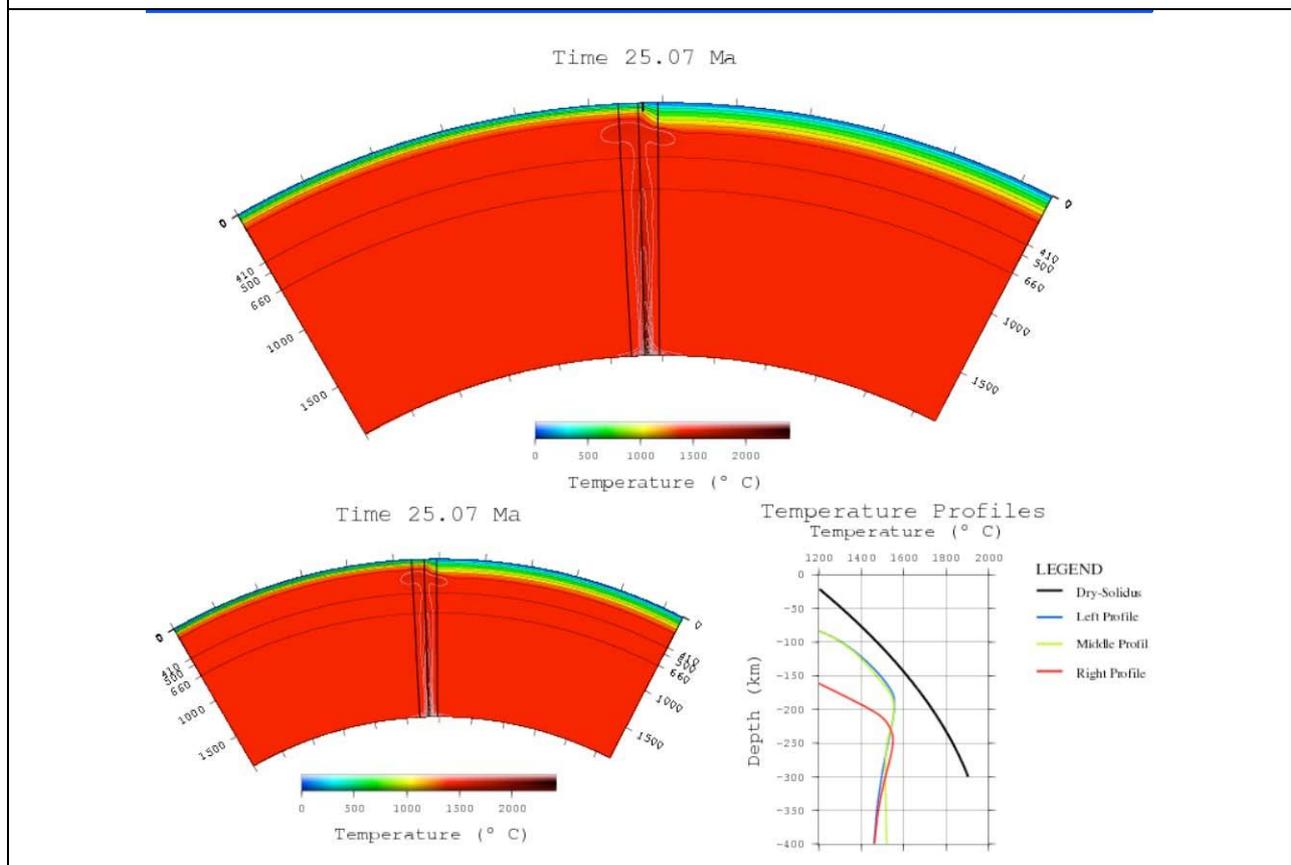


Figura 18. Aplicatii online. PlumeIMPACT: Model numeric - Pas de timp: 25.07 Ma

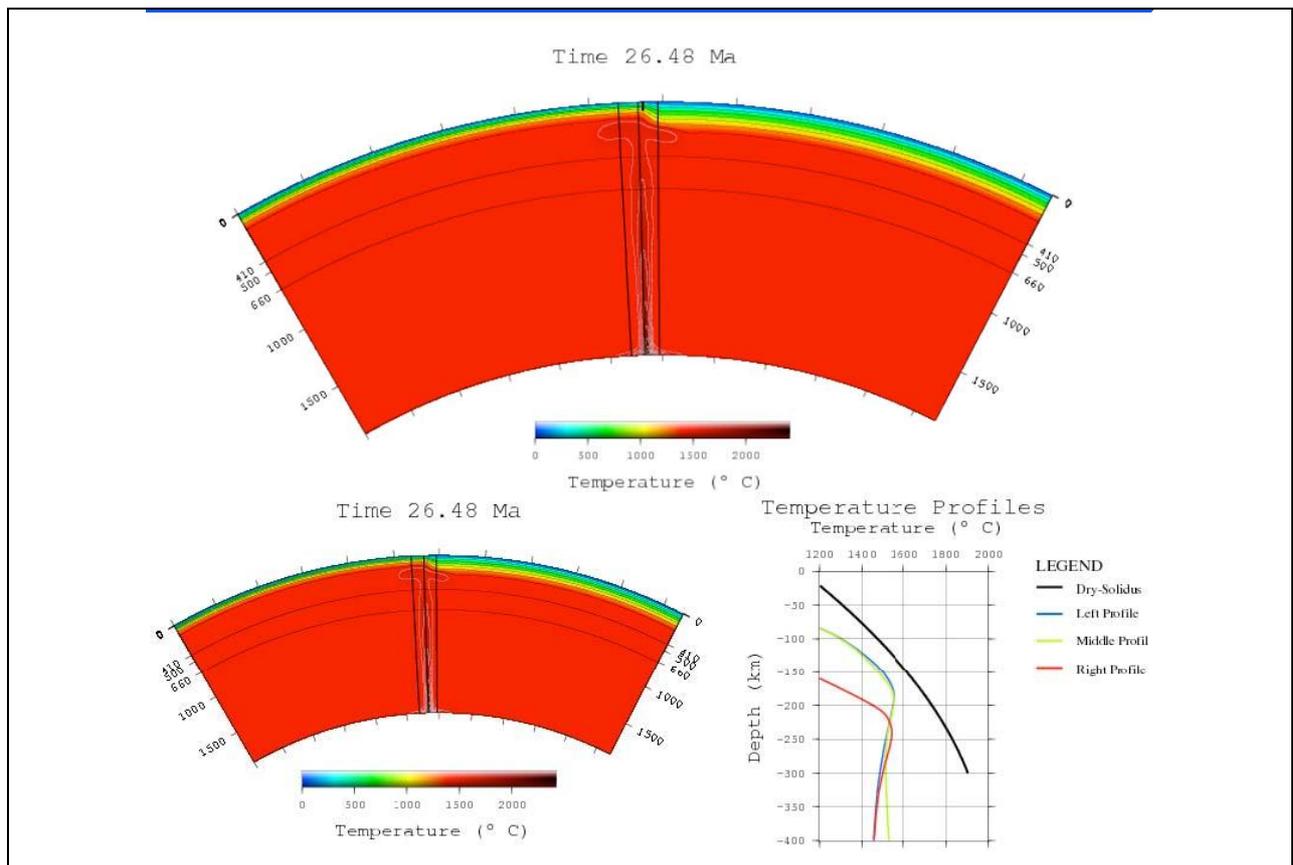


Figura 19. Aplicatii online. PlumeIMPACT: Model numeric - Pas de timp: 26.48 Ma

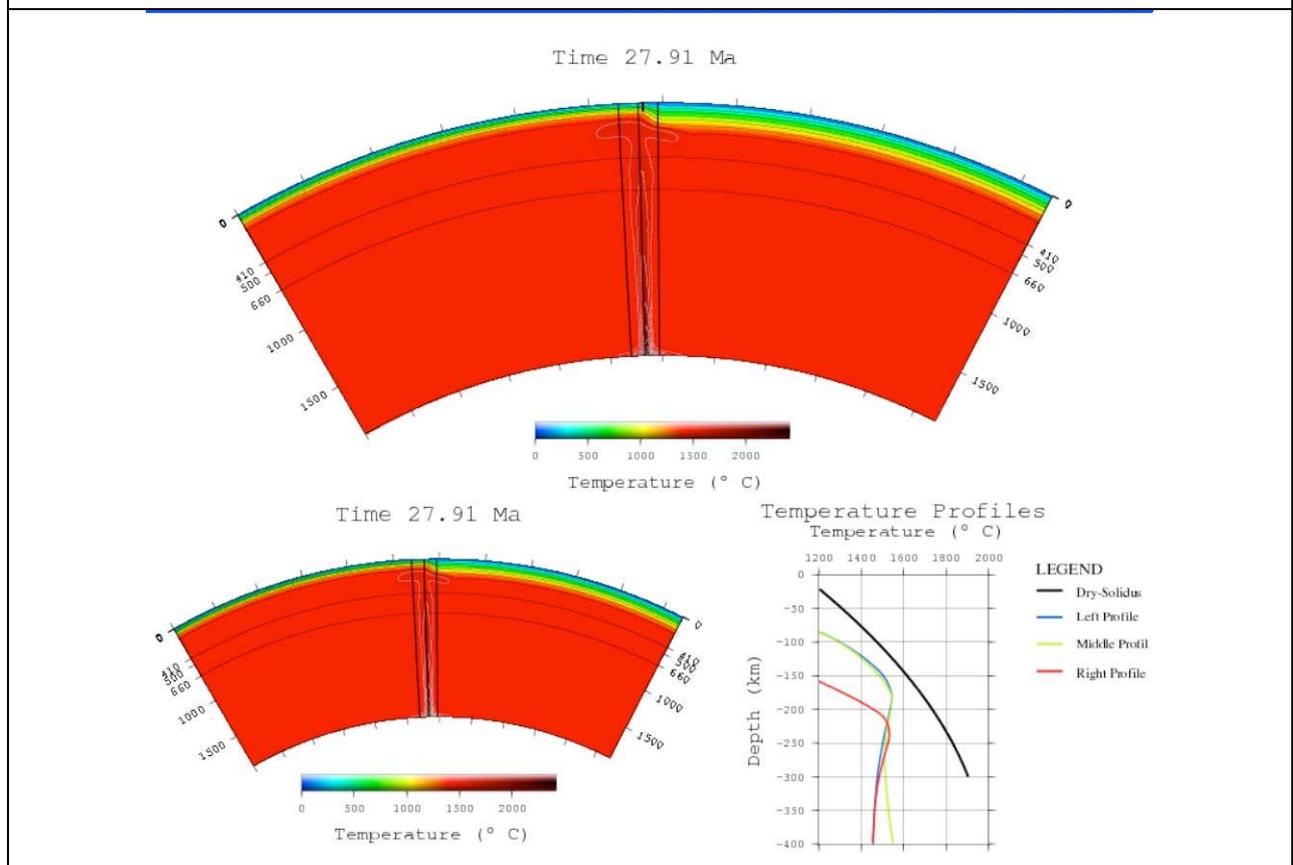


Figura 20. Aplicatii online. PlumeIMPACT: Model numeric - Pas de timp: 27.91 Ma

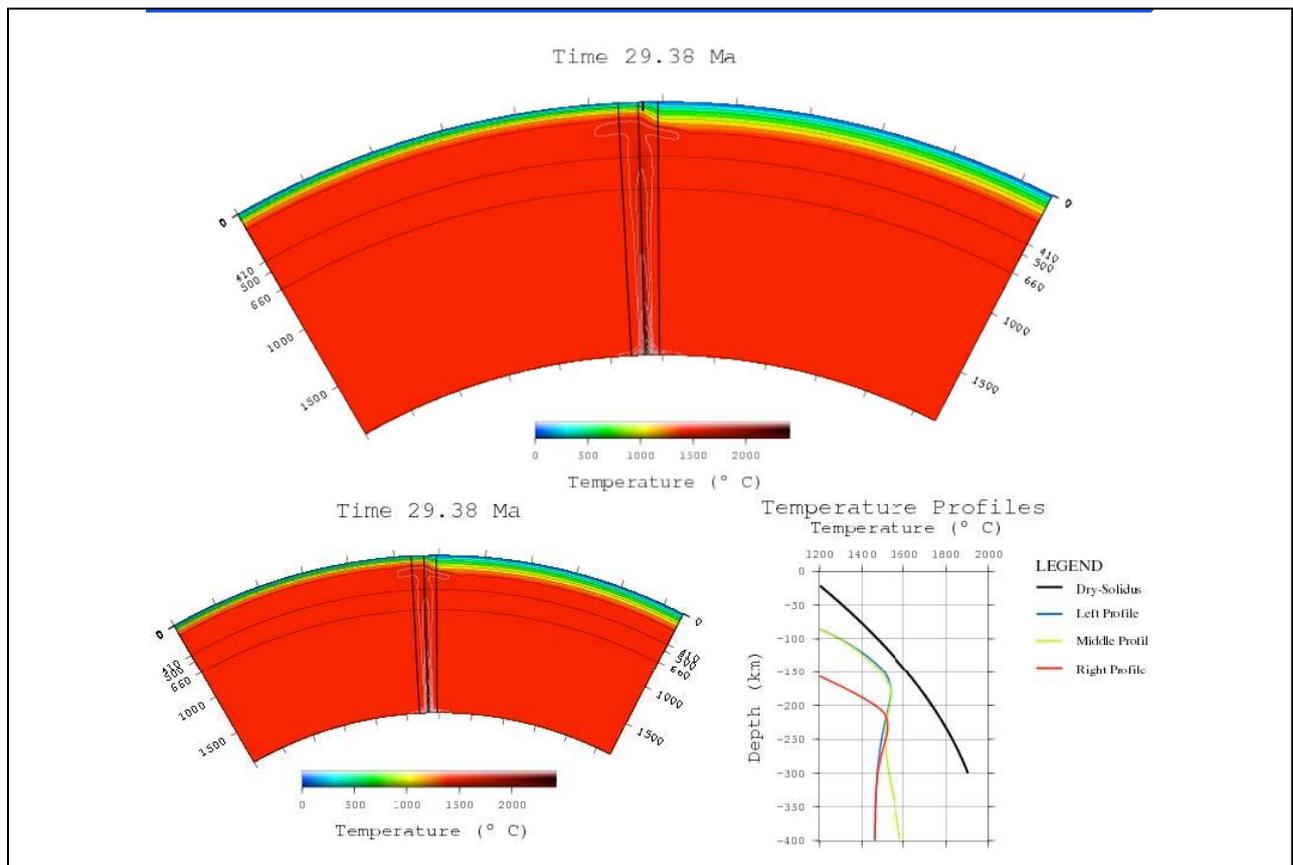


Figura 21. Aplicatii online. PlumeIMPACT: Model numeric - Pas de timp: 29.38 Ma

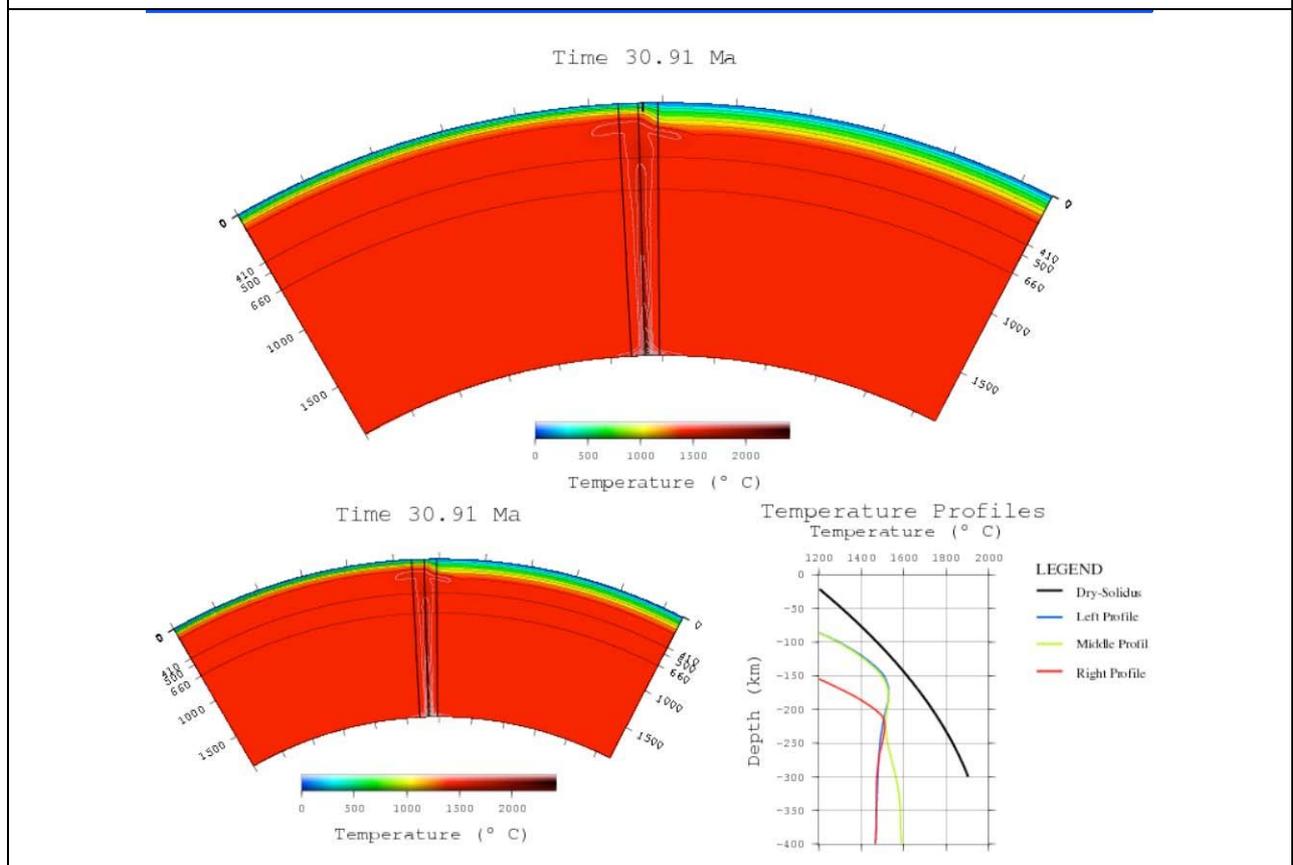


Figura 22. Aplicatii online. PlumeIMPACT: Model numeric - Pas de timp: 30.91 Ma

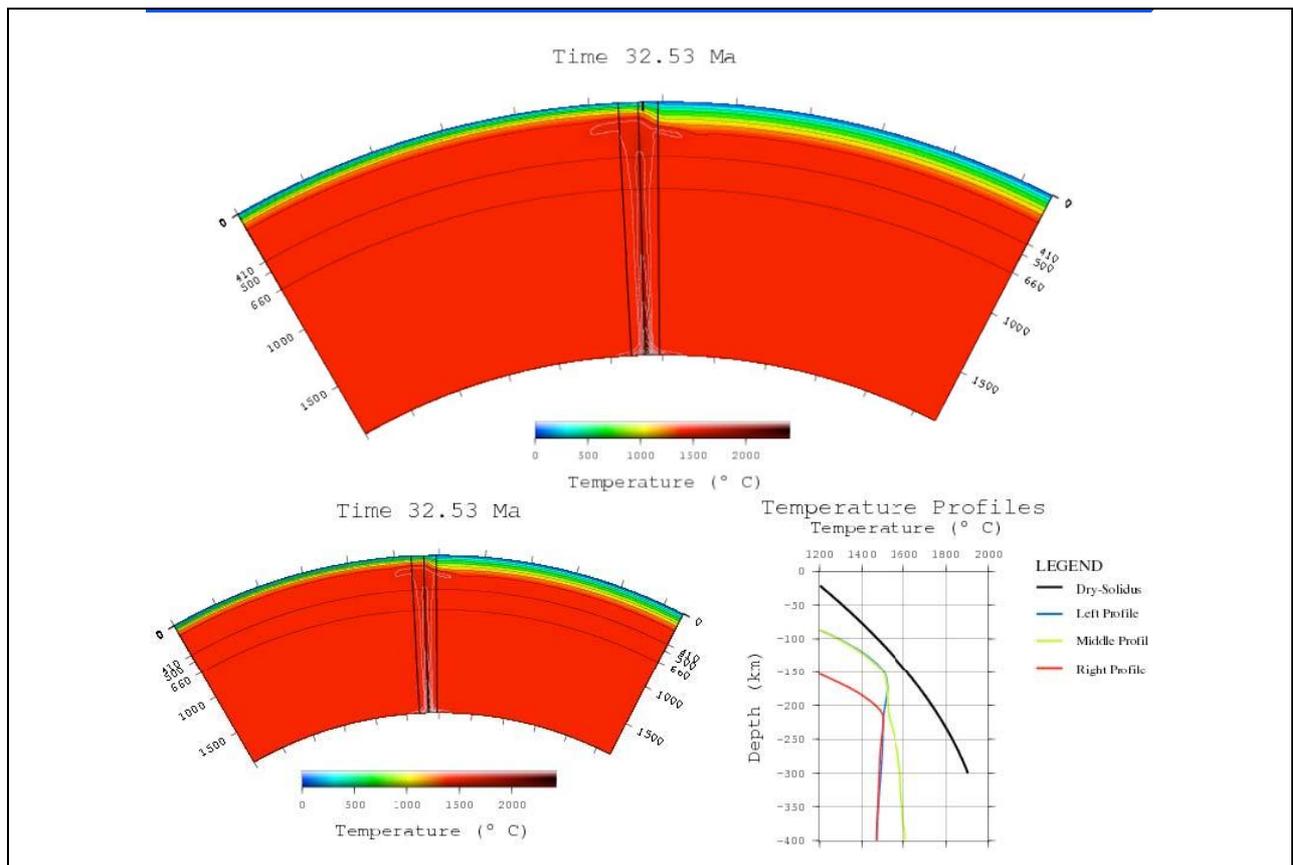


Figura 23. Aplicatii online. PlumeIMPACT: Model numeric - Pas de timp: 32.53 Ma

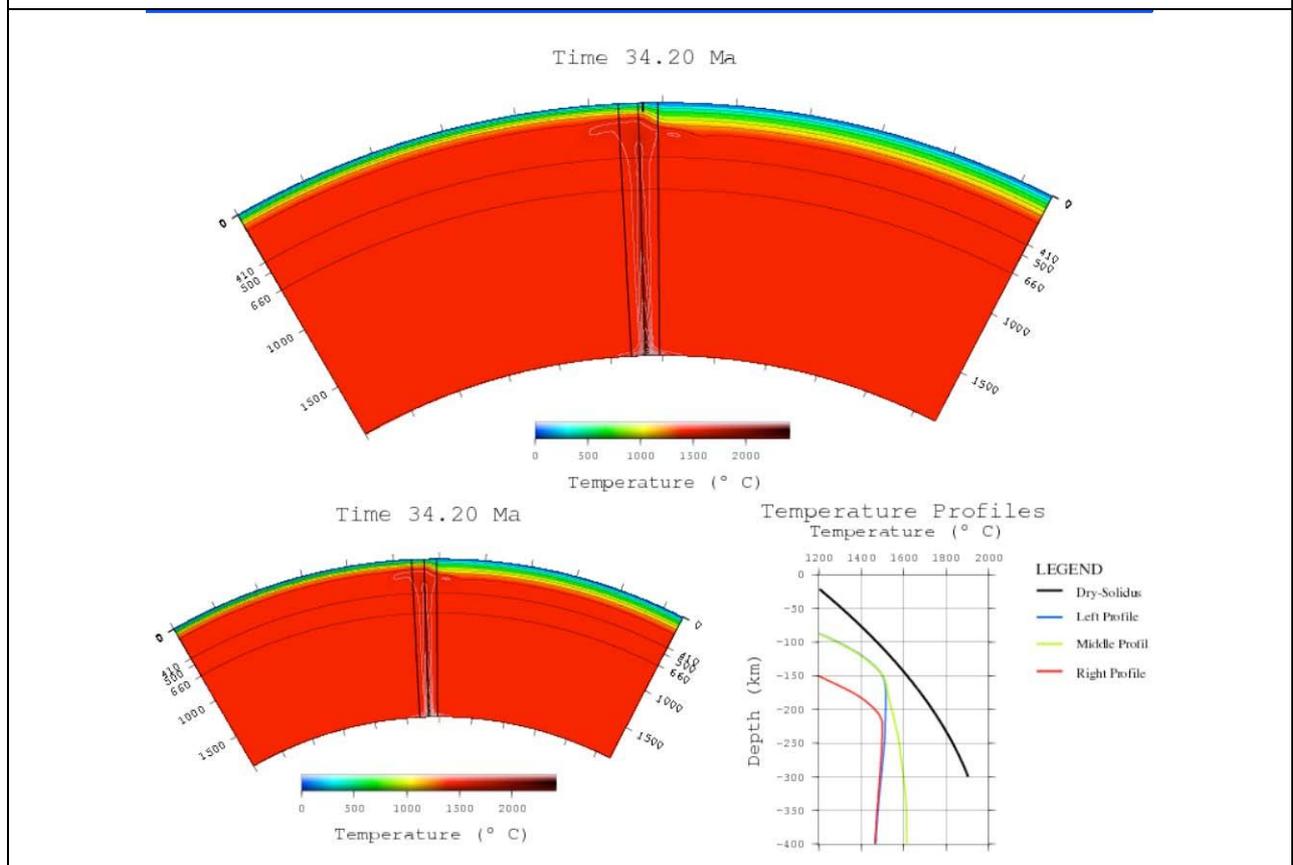


Figura 24. Aplicatii online. PlumeIMPACT: Model numeric - Pas de timp: 34.20 Ma

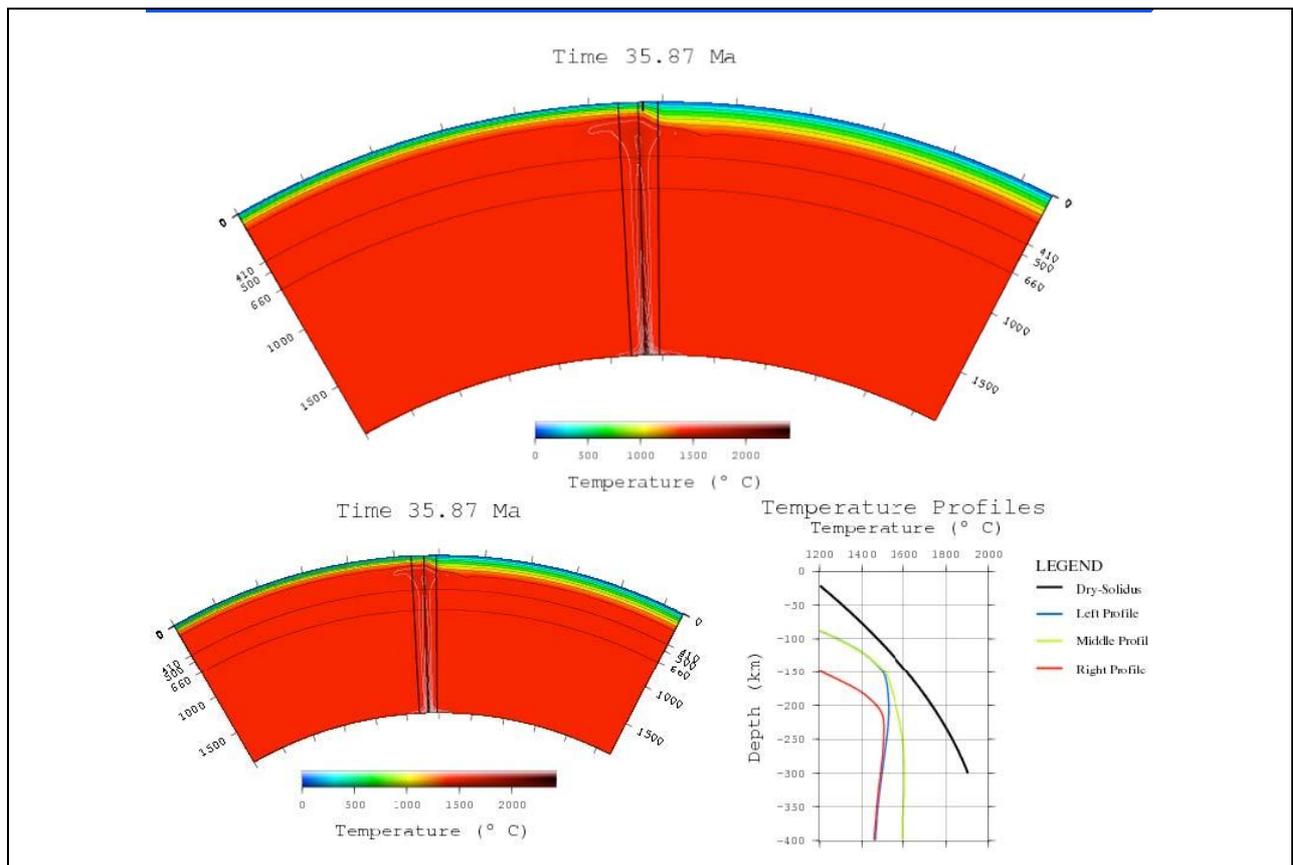


Figura 25. Aplicatii online. PlumeIMPACT: Model numeric - Pas de timp: 35.87 Ma

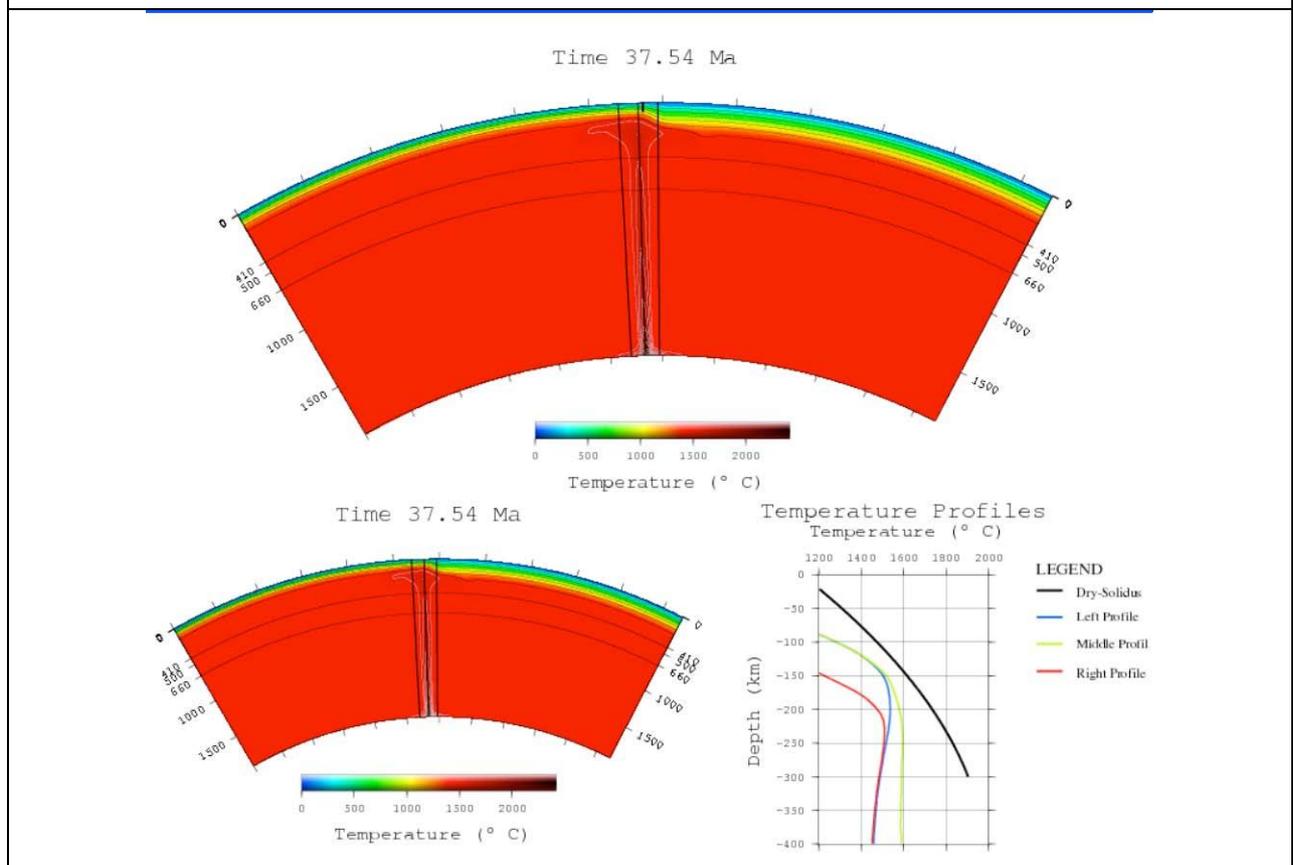


Figura 26. Aplicatii online. PlumeIMPACT: Model numeric - Pas de timp: 37.54 Ma

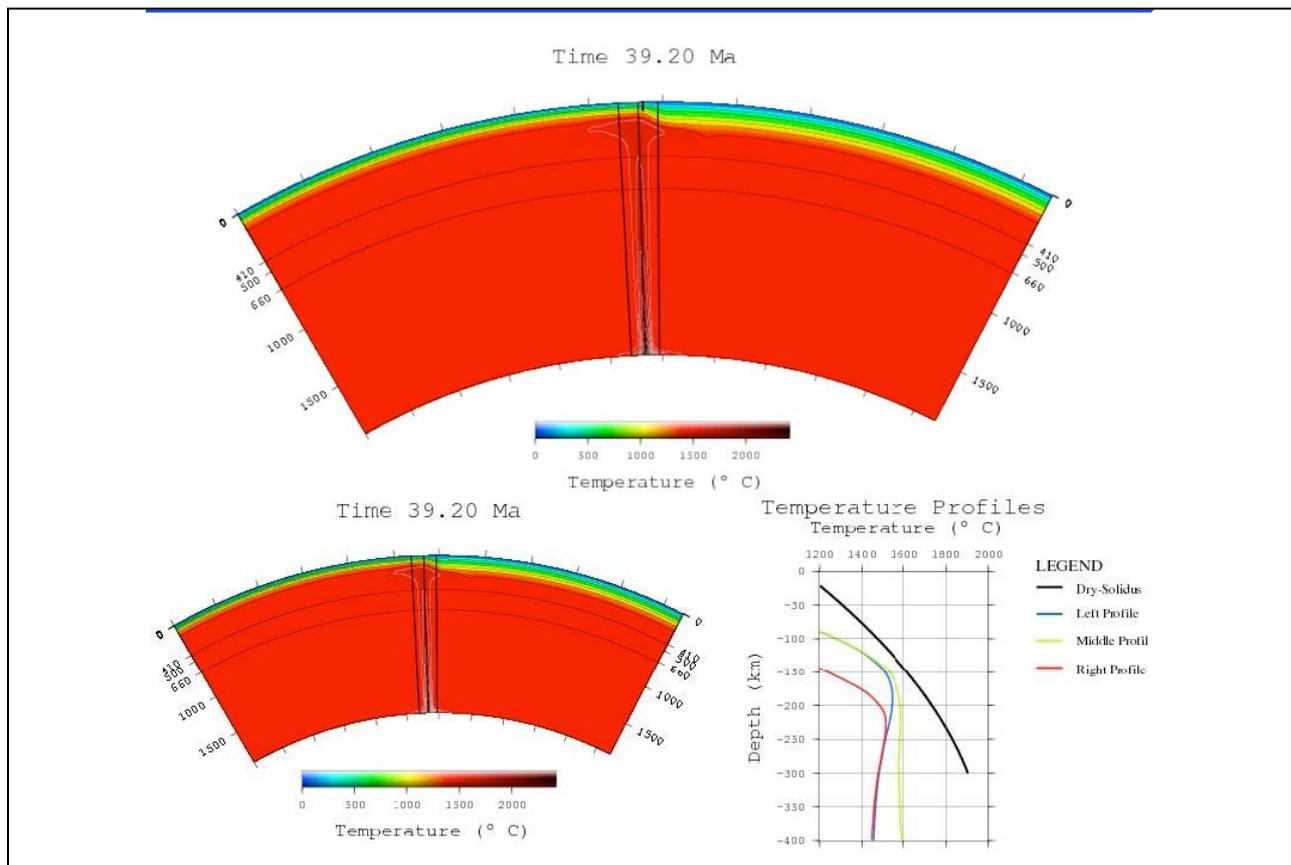


Figura 27. Aplicatii online. PlumeIMPACT: Model numeric - Pas de timp: 39.20 Ma.

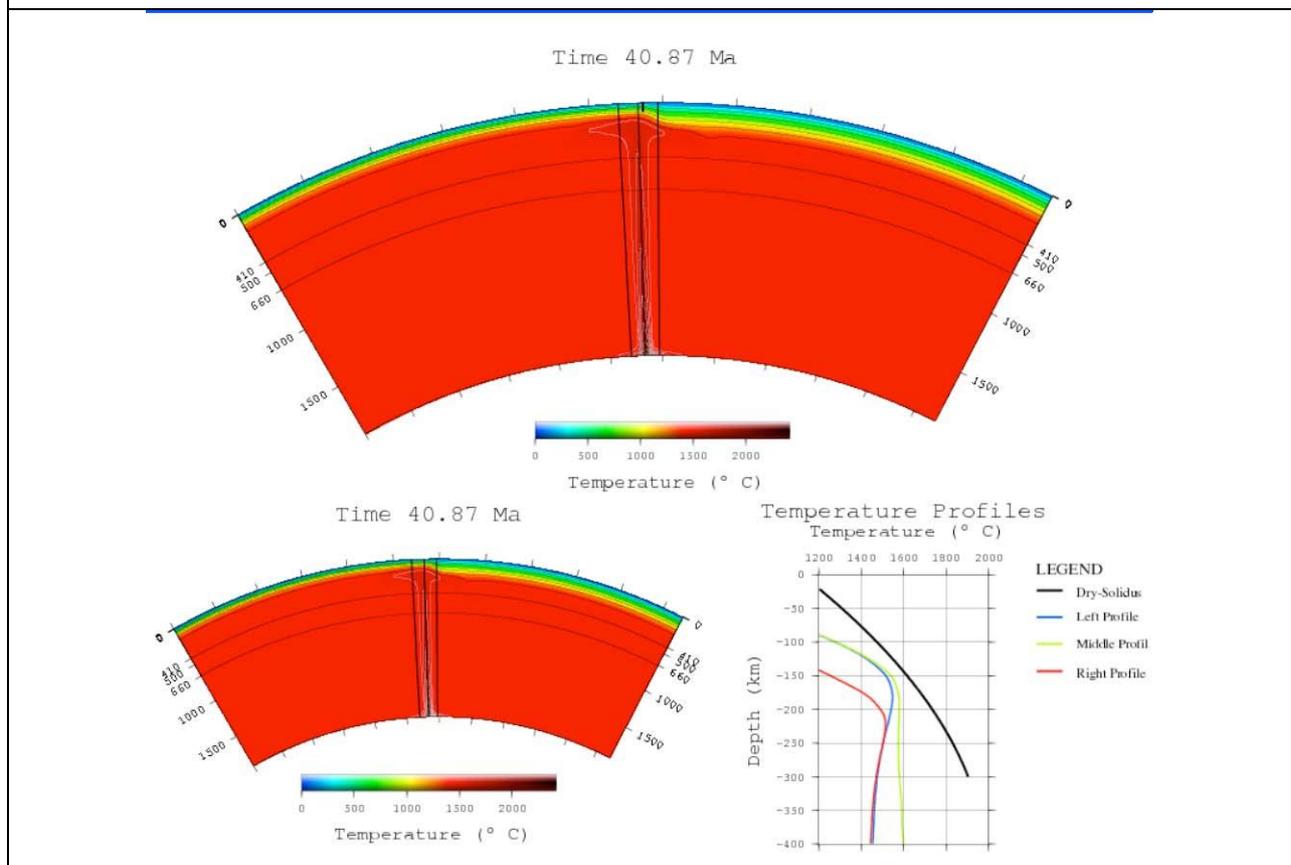


Figura 28. Aplicatii online. PlumeIMPACT: Model numeric - Pas de timp: 40.87 Ma

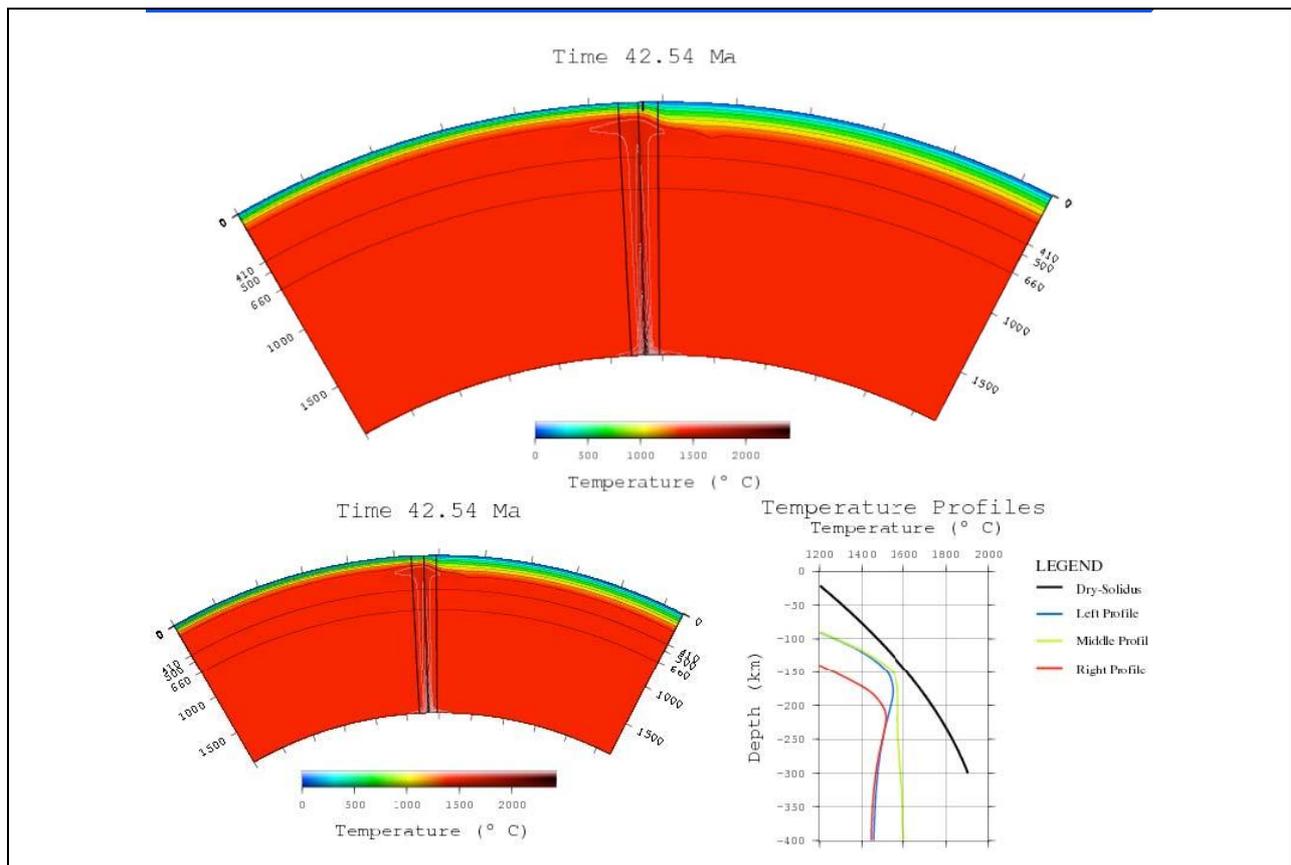


Figura 29. Aplicatii online. PlumeIMPACT: Model numeric - Pas de timp: 42.54 Ma

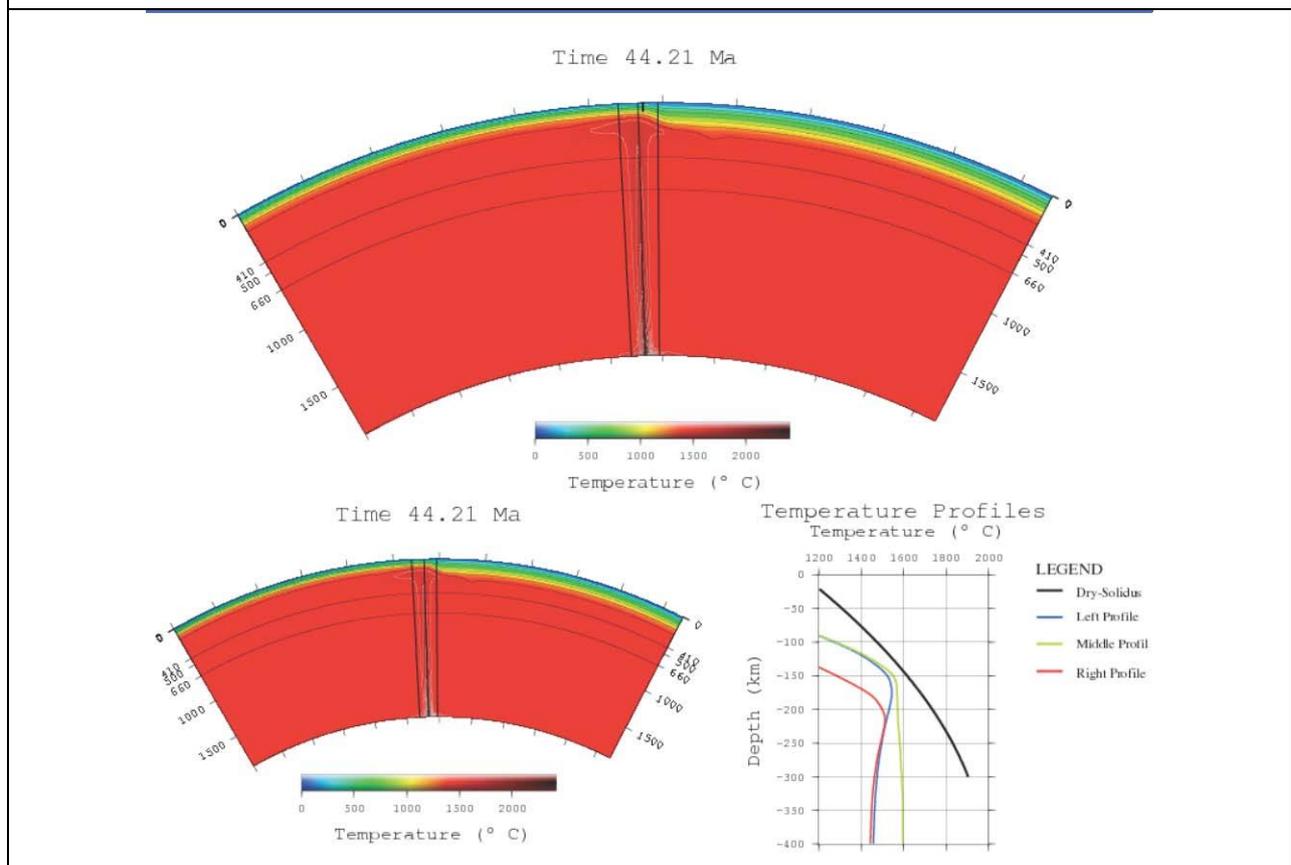


Figura 30. Aplicatii online. PlumeIMPACT: Model numeric - Pas de timp: 44.21 Ma

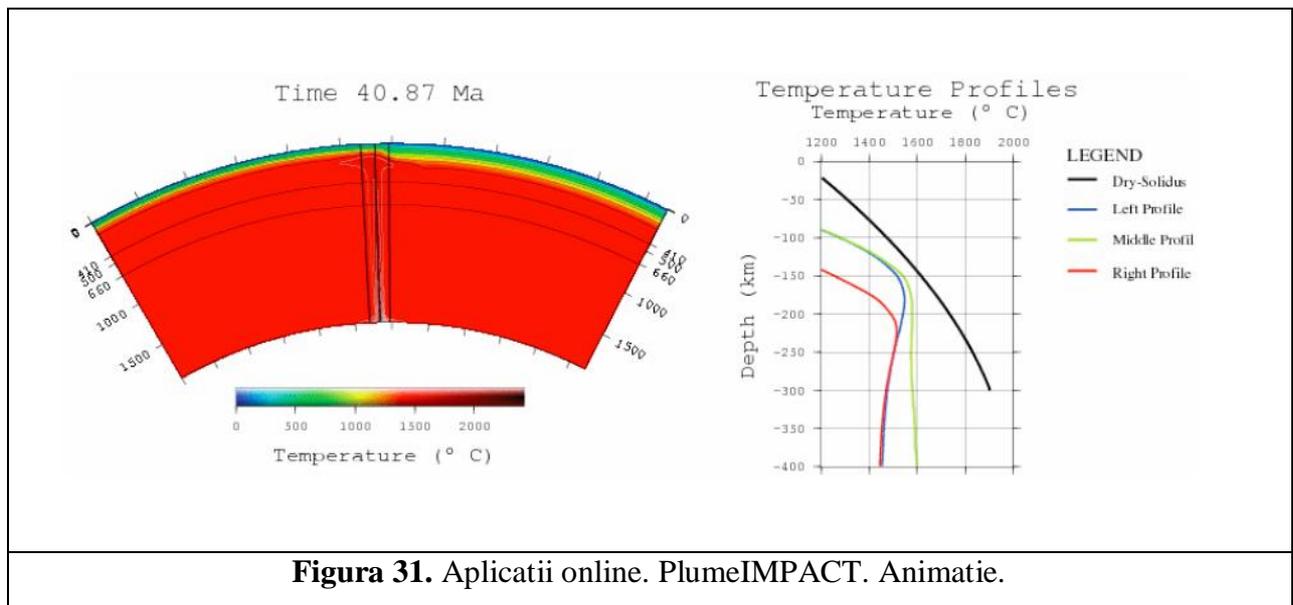


Figura 31. Aplicatii online. PlumeIMPACT. Animatie.

Toata informatia referitoare la modele este extrasa din baza de date realizata in MySQL, cyberdynprojdb, care este accesata de care pagina proiectului, din tabelul app_plumeimpact (figura 32).

The screenshot displays the phpMyAdmin interface for the 'app_plumeimpact' database. The main content area shows a table with 30 rows of data. The table structure is as follows:

ID	model_id	plume_head	temp_excess	dens_excess	lithos_thick	lithos_visc	top_BC
1	A_1	300	150	30	200	106#94;23	free_slip
2	A_2	400	250	30	200	106#94;23	free_slip
3	A_3	500	300	30	200	106#94;23	free_slip
4	B_1	300	150	30	150	106#94;23	free_slip
5	B_2	400	250	30	150	106#94;23	free_slip
6	B_3	500	300	30	150	106#94;23	free_slip
7	C_1	300	150	50	200	106#94;23	free_slip
8	C_2	500	300	50	200	106#94;23	free_slip
9	D_1	300	150	50	150	106#94;23	free_slip
10	D_2	400	250	50	150	106#94;23	free_slip
11	E_1	300	150	50	150	5x106#94;22	free_slip
12	E_2	400	250	50	150	5x106#94;22	free_slip
13	F_1	300	150	30	200	5x106#94;22	free_slip
14	F_2	300	150	30	200	3x106#94;22	free_slip
15	F_3	300	150	30	200	1x106#94;22	free_slip
16	G_1	300	150	50	200	5x106#94;22	free_slip
17	G_2	400	250	50	200	5x106#94;22	free_slip
18	G_3	500	300	50	200	5x106#94;22	free_slip
19	H_1	400	250	30	200	3x106#94;22	free_slip
20	H_2	400	250	50	150	3x106#94;22	free_slip
21	AA_1	300	150	30	200	106#94;23	2cm/yr
22	AA_2	400	250	30	200	106#94;23	2cm/yr
23	AA_3	500	300	30	200	106#94;23	2cm/yr
24	BB_1	300	150	30	150	106#94;23	2cm/yr
25	BB_2	400	250	30	150	106#94;23	2cm/yr
26	BB_3	500	300	30	150	106#94;23	2cm/yr
27	CC_1	300	150	50	200	106#94;23	2cm/yr
28	CC_2	500	300	50	200	106#94;23	2cm/yr
29	DD_1	300	150	50	150	106#94;23	2cm/yr
30	DD_2	400	250	50	150	106#94;23	2cm/yr

Figura 32. Aplicatii online. PlumeIMPACT. Baza de date

In cadrul aplicatiei PlumeIMPACT exista o optiune, Interactive3D (figura33). Aceasta optiune permite utilizatorului online manipularea unui model tridimensional ce prezinta impactul unei plume si delaminarea litosferica rezultanta. Rezultatele provin in urma procesarii datelor obtinute prin rularea modelelor numerice pe cluster, postprocesarea datelor si vizualizarea in

programul ParaView. Fișierele sunt exportate într-un fișier PDF care poate fi accesat online sau poate fi descărcat și deschis cu Adobe Reader. Singura condiție pentru accesarea optimă a datelor este ca Adobe Reader să aibă o versiune recentă (este recomandabil să fie mai mare de Adobe Reader v.9). De asemenea, browserul trebuie să fie capabil să deschidă fișierul PDF și pentru aceasta trebuie instalat ultimul plug-in pentru browserul folosit.

The screenshot shows the Cyberdyn website interface. At the top left is the Cyberdyn logo. A navigation menu on the left lists various sections like 'PAGINA PRINCIPALĂ', 'CYBERDYN', 'PERSONAL', etc. The main content area features a header with navigation links for 'APLICAȚII @NLINE', '2D-GEODATA', '3D-GEODATA', and 'GEOMODELS'. Below this, there are sub-links for 'PlumeIMPACT', 'COLLISION&BREAKOFF', 'GravINSTAB', and 'SlabDETACHMENT'. The central text reads 'APLICAȚII @NLINE...:GEOMODELS...:PlumeIMPACT...:Interactive3D' and 'Infrastructură Cibernetică pentru Studii Geodinamice Relaționate cu Zona Seismogenică Vrancea'. A section titled 'PlumeIMPACT - Delaminarea litosferică rezultată în urma impactului cu o pluma termo-chimică' contains a warning about browser requirements and instructions to download PDF files. Below this is a PDF viewer window titled 'Plume Impact'.

Figura 33. Aplicații online. PlumeIMPACT. Interactive3D

Există două fișiere PDF interactive 3D, unul care prezintă situația inițială în cazul impactului (figura 34) și al doilea fișier care prezintă situația finală (figura 35)

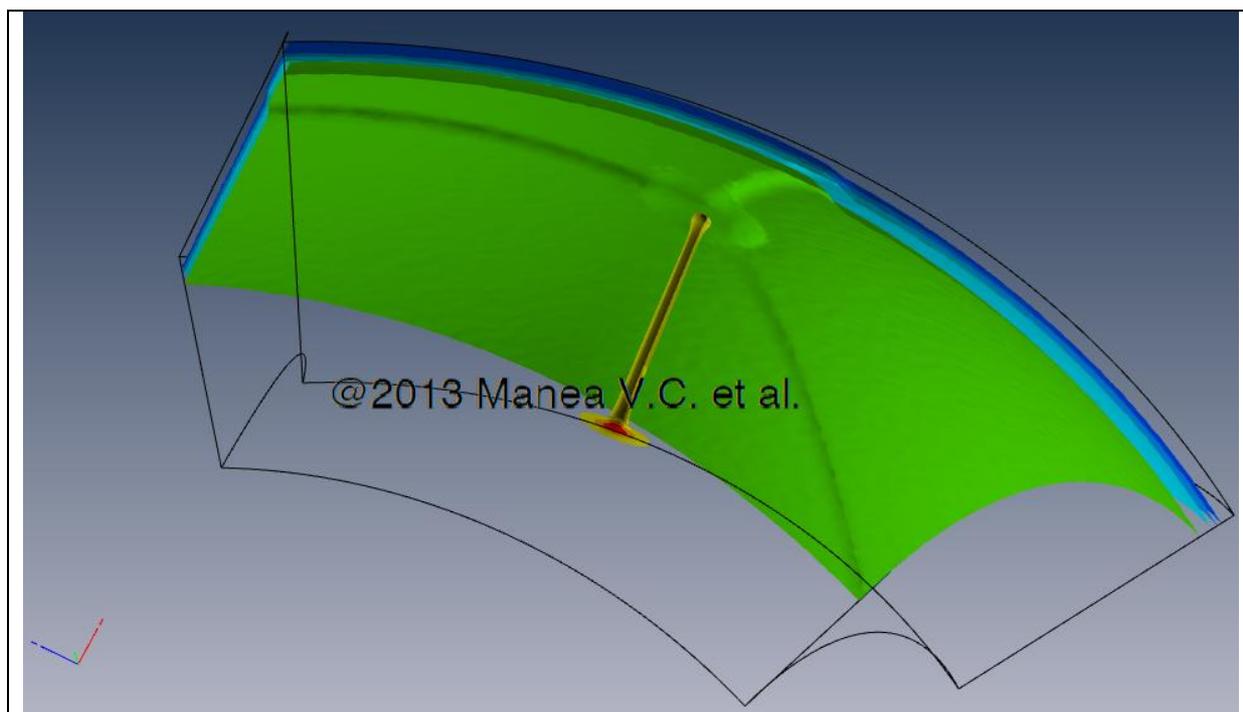


Figura 34. Aplicatii online. PlumeIMPACT. Interactive3D initial

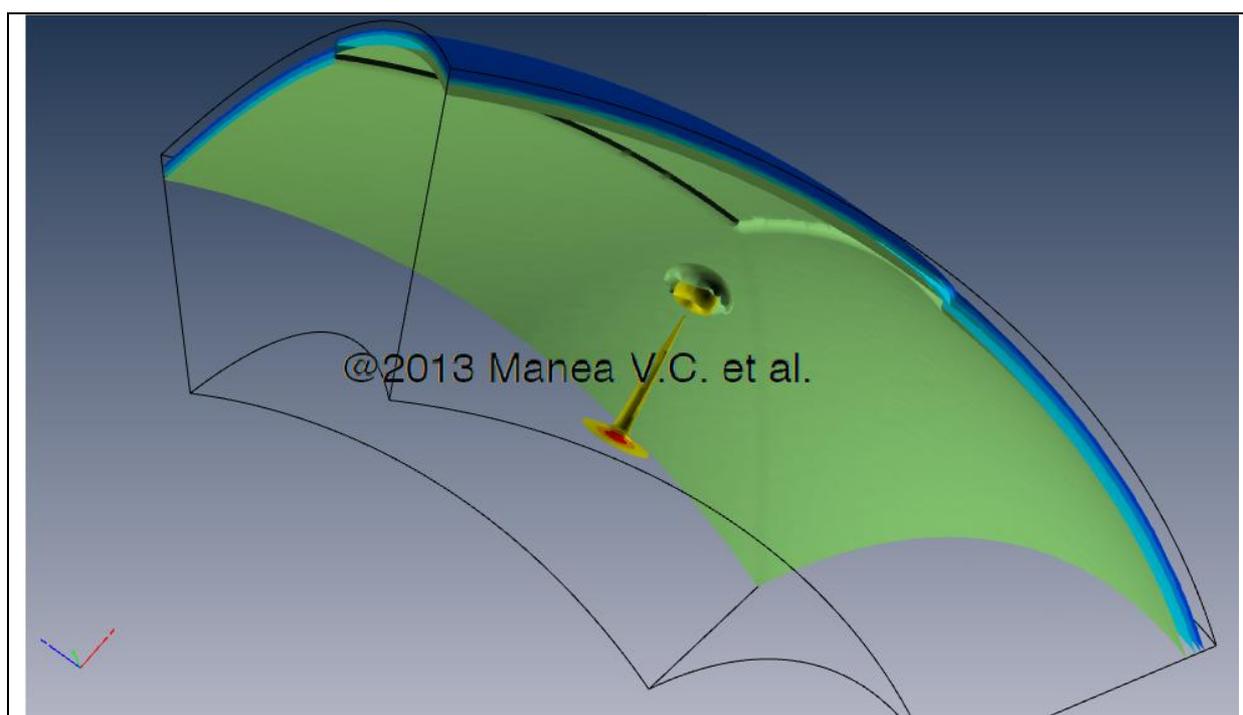
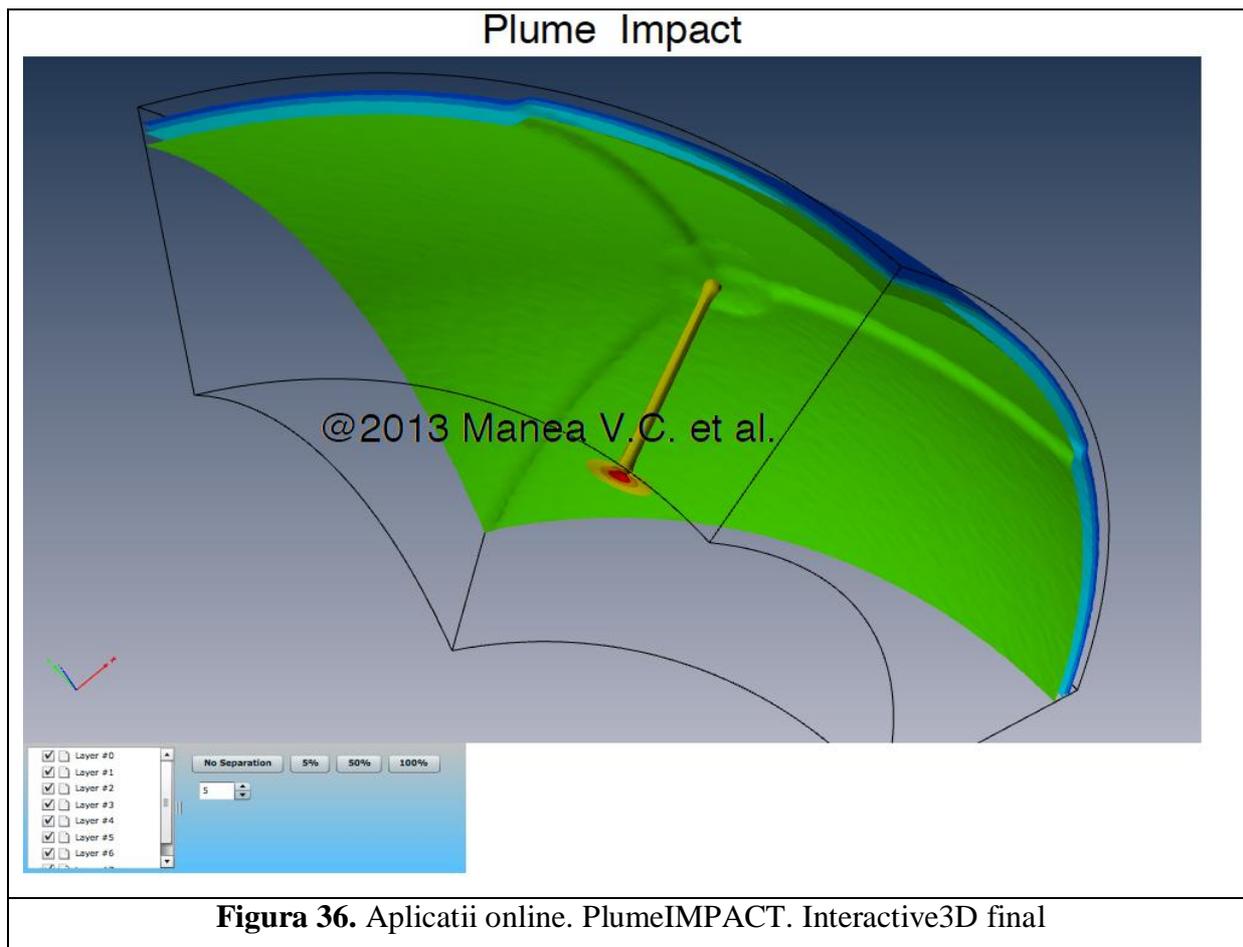


Figura 35. Aplicatii online. PlumeIMPACT. Interactive3D final

Odata accesat fisierul PDF, utilizatorul poate interoga figura 3D, rotind-o, miscand-o in plan orizontal si vertical. Figura se poate ilumina din diverse unghiuri, se poate roti. De asemenea, in partea de jos a imaginii exista un menu in care diferitele layere, reprezentand izotermele modelului pot fi activate/dezactivate (figura 36).



Modelul se poate sectiona (figura 37) folosindu-se optiunile din menu-ul pentru sectionare (figura 38).

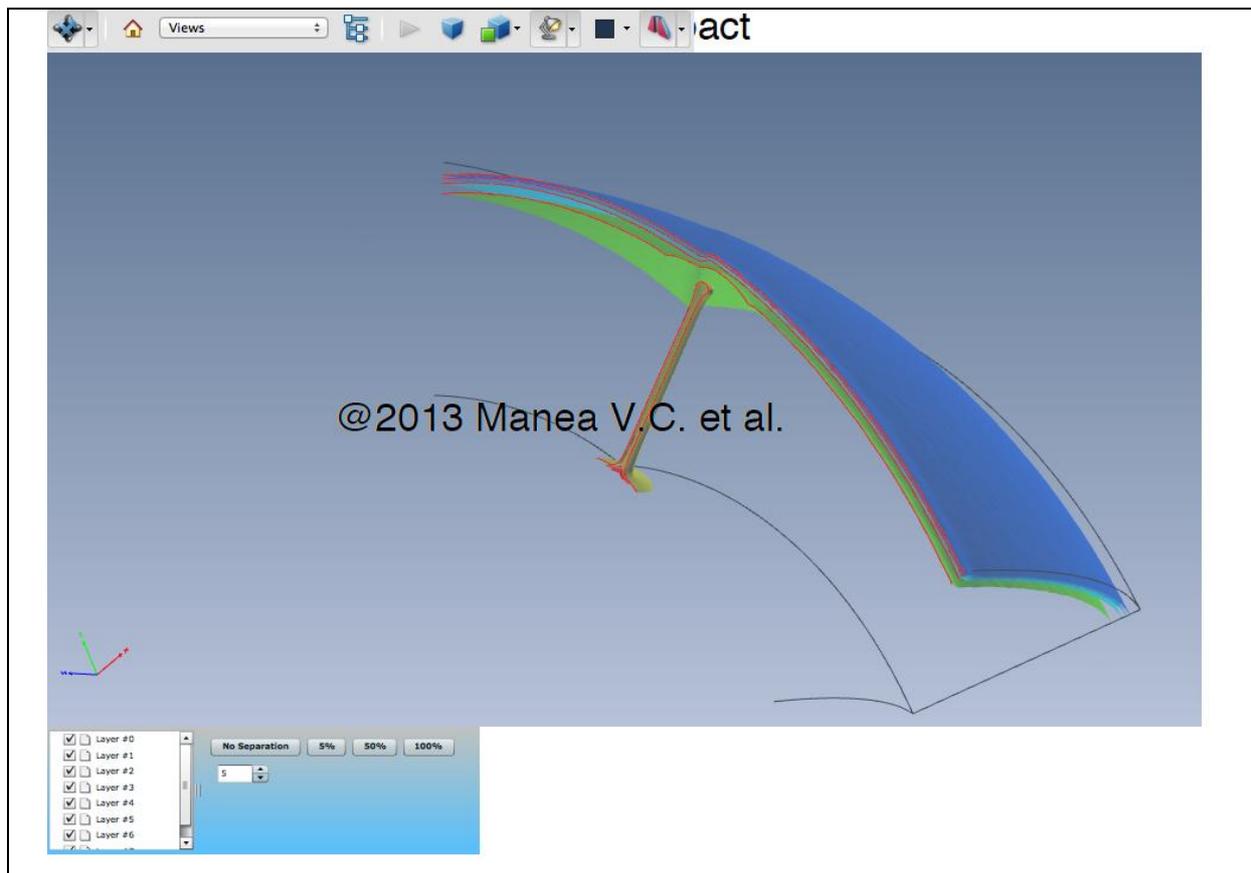


Figura 37. Aplicatii online. PlumeIMPACT. Interactive3D sectionarea modelului

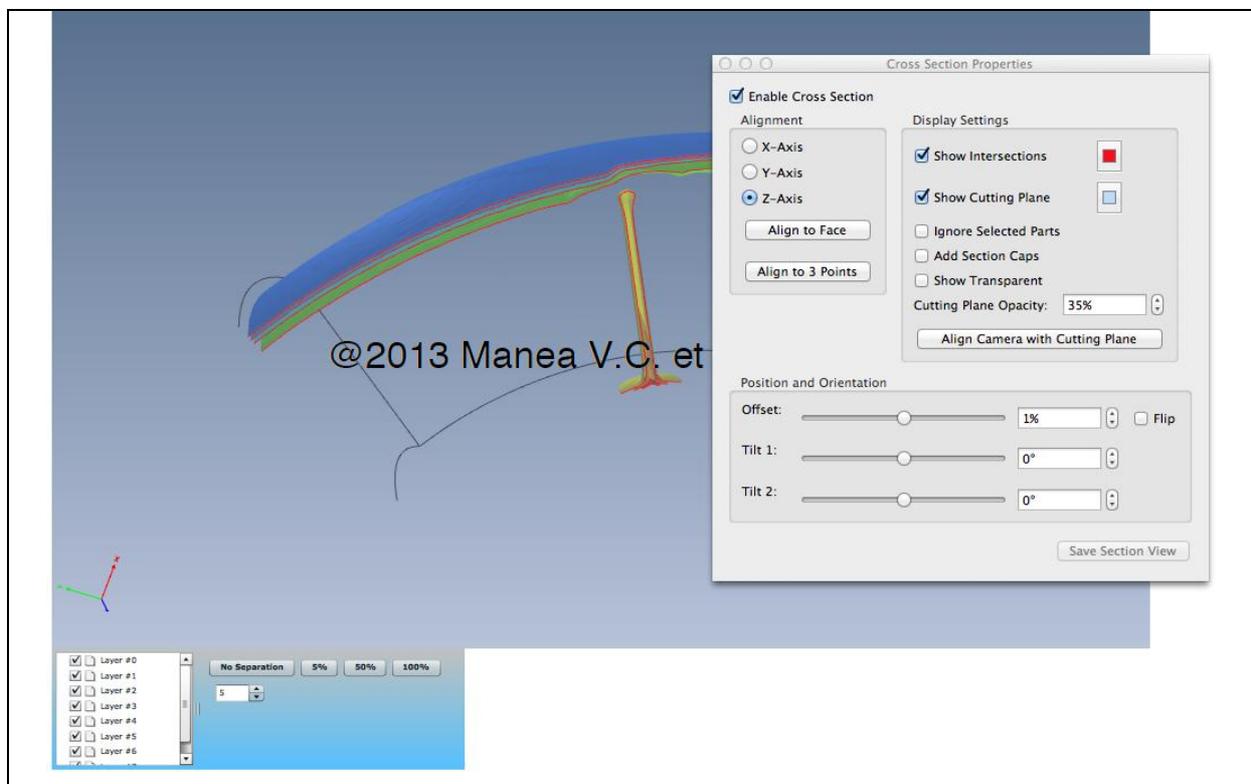


Figura 38. Aplicatii online. PlumeIMPACT. Interactive3D sectionarea modelului

6.2. APLICATIA GEOMODELS – Collision&Breakoff

Deformatia Crustala asociata coliziunii continentale.

Coliziunea continentală (figura 39) reprezintă un alt scenariu geodinamic care a fost abordat prin modelare numerică. Această modelare a fost realizată cu ajutorul HPCC-ului CyberDyn. Setarea numerică a modelului se bazează pe principiile de modelare introduse de *Gerya (2010)*. Modelul folosește o suprafață internă de eroziune/sedimentare (*Gerya & Yuen, 2003*) care separă limita superioară a litosferei de stratul inconjurator apă/aer, cu o densitate stratificată. Setarea modelului încorporează o litosferă oceanică prezentă inițial între două plăci continentale, permițând o inițiere mult mai naturală și mai apropiată de realitate, ce capturează etapele inițiale ale procesului de coliziune. În timpul acestor etape, comportamentul modelului variază rapid datorită apropierii de zona de subducție a crustei continentale pozitiv flotante. Domeniul de calcul pentru model este de 1000x300 km și folosește o rețea rectangulară neuniformă de 201x61 cu o rezoluție foarte înaltă de 2x2 km în zona de subducție/coliziune de 300x60 km.

Condițiile la limită sunt următoarele: modelul se reduce pe orizontală, iar limita din stânga nu își schimbă poziția în timp, rămânând fixă. Pentru a compensa îngrosarea stratului aer/apă pe suprafața modelului, nivelul apei se schimbă la fiecare pas de timp. Crusta continentală are o grosime de 35 de km, cu stratele superioare și inferioare de egală grosime. Zona de subducție la limita stângă ocean/continent este descrisă ca o zonă slabită de 4-15 km ce intersectează întreaga manta litosferică și ajunge până la o adâncime de 90 km. Zona slabită este descrisă ca o zonă de falie cu comportament casant/plastic hidratată, caracterizată prin parametrii reologici ai olivinei hidratate. În timpul subducției, zona predefinită ca fiind slabită, este înlocuită într-o manieră spontană de rocile crustale subduse, conservând decuplarea în lungul suprafeței (figura 40).

APLICAȚII @NLINE...GEOMODELS...ContinentCollision

Infrastructură Cibernetică pentru Studii Geodinamice Relaționate cu Zona Seismogenică Vrancea

ContinentCollision - Deformatie crustala asociata coliziunii continentale

Continental collision is another geodynamic scenario addressed by numerical modelling and performed with the HPCC CyberDyn. This numeric setup follows Gerya (2010) as model uses an internal evolving erosion/sedimentation surface (Gerya and Yuen, 2003) that separates the top boundary of the lithosphere from the overlaying sticky water/air layer with vertically stratified density (either 'air', 1 kg/m^3 , for $y < y_{\text{water}}$ or 'water', 1000 kg/m^3 , for $y > y_{\text{water}}$, where y_{water} is the water level adopted in the model). The model setup incorporates an oceanic lithosphere initially present between the two continental plates, allowing a more natural beginning and more faithfully captures the initial stages of the collision process. During these stages, the model behavior changes rapidly due to the arrival of the positively buoyant continental crust in the subduction zone. The model domain is $1000 \times 300 \text{ km}$ and uses a non-uniform 201×61 rectangular grid with a constant high resolution of $2 \times 2 \text{ km}$ in the $300 \times 60 \text{ km}$ area of the subduction/collision zone. Coarser resolution around this zone changes at every time step in response to the model shortening (leftward) and thickening (downward), which accommodate the convergence whose velocity is prescribed at the right model boundary. Boundary conditions are as following: the model is shortening and the left boundary does not change position with time. In order to compensate for the thickening of the sticky air/water layer on the top of the model, the water level changes at every time step. The continental crust is 35 km thick, with the upper and lower crustal layers of equal thickness. The nucleated subduction zone at the left ocean/continent boundary is prescribed as a $4 - 15 \text{ km}$ wide weak zone cutting across the entire mantle lithosphere and reaching a depth of 90 km . The weak zone is prescribed as a wet brittle/plastic fault within mantle rocks, characterised by wet olivine rheological parameters and a low plastic strength of 1 MPa (i.e. assuming a high pore fluid pressure and $\sin(\phi)=0$). During subduction, the pre-defined weak zone is spontaneously replaced by weak subducted crustal rocks, thereby preserving the decoupling along the interface.

Gerya, T. V. and Yuen, D. A. (2003) Rayleigh - Taylor instabilities from hydration and melting propel cold plumes at subduction zones. *Earth and Planetary Science Letters*, 212, 47 - 62.

Gerya, T.V. (2010) *Introduction to Numerical Geodynamic Modeling*, Cambridge University Press.

Figura 39. Aplicatii online. ContinentCollision. Initial Setup

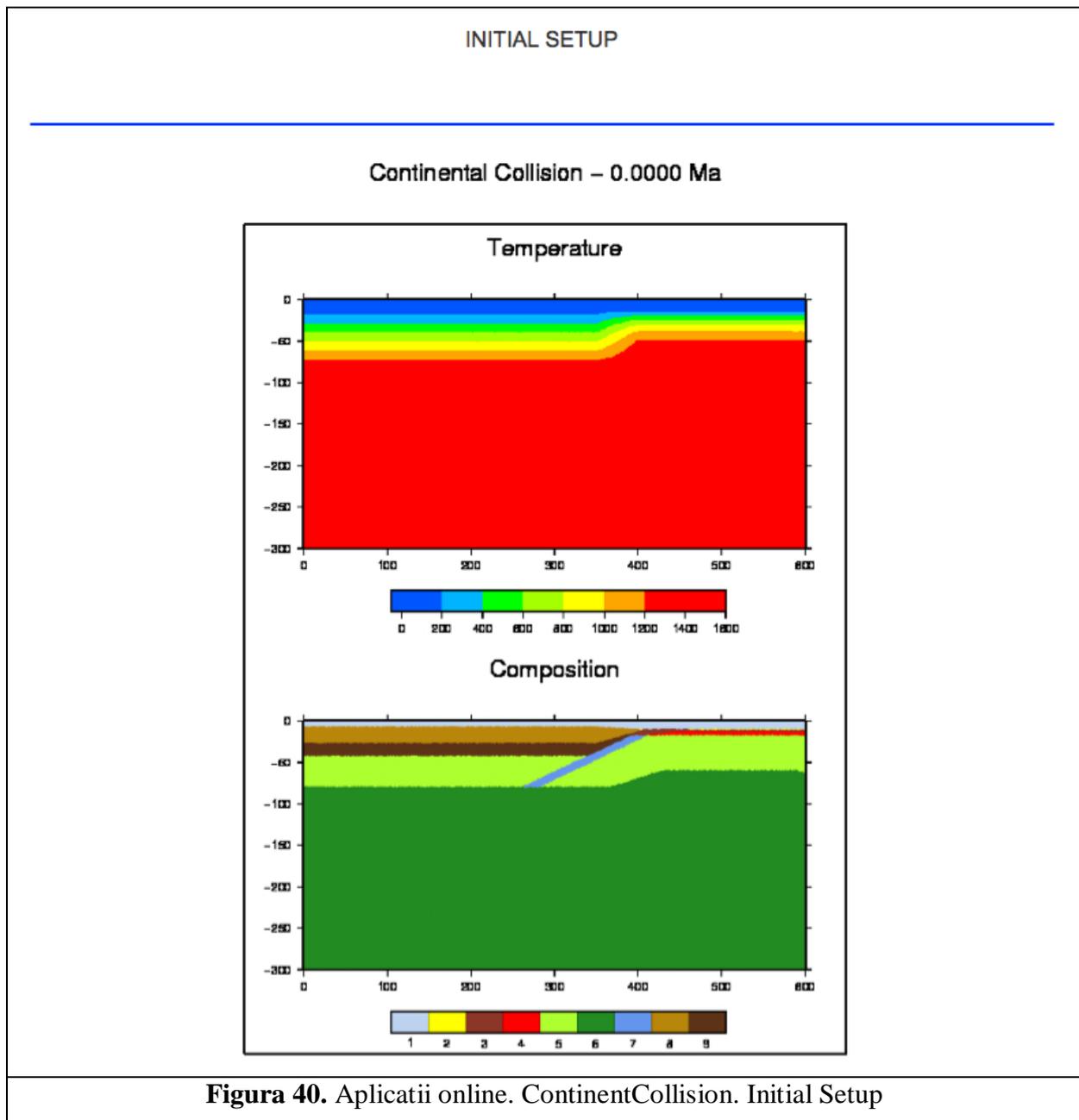


Figura 40. Aplicatii online. ContinentCollision. Initial Setup

Sunt prezentate o serie de sase modele numerice (figura 41), sub forma de animatii, in care parametrii cum ar fi varsta (in Ma) si viteza placii (in cm/an) sunt variati pentru a testa mai multe scenarii. In figurile 42-47 sunt prezentate diferitele modele animate.

MODELS

MODEL NAME	AGE (Ma)	PLATE VELOCITY (cm/yr)
<u>A1</u>	10	1
<u>A2</u>	10	2
<u>A3</u>	10	3
<u>B1</u>	20	1
<u>B2</u>	20	2
<u>B3</u>	20	3

Figura 41. Aplicatii online. ContinentCollision. Modele

Continental Collision – 10.5762 Ma

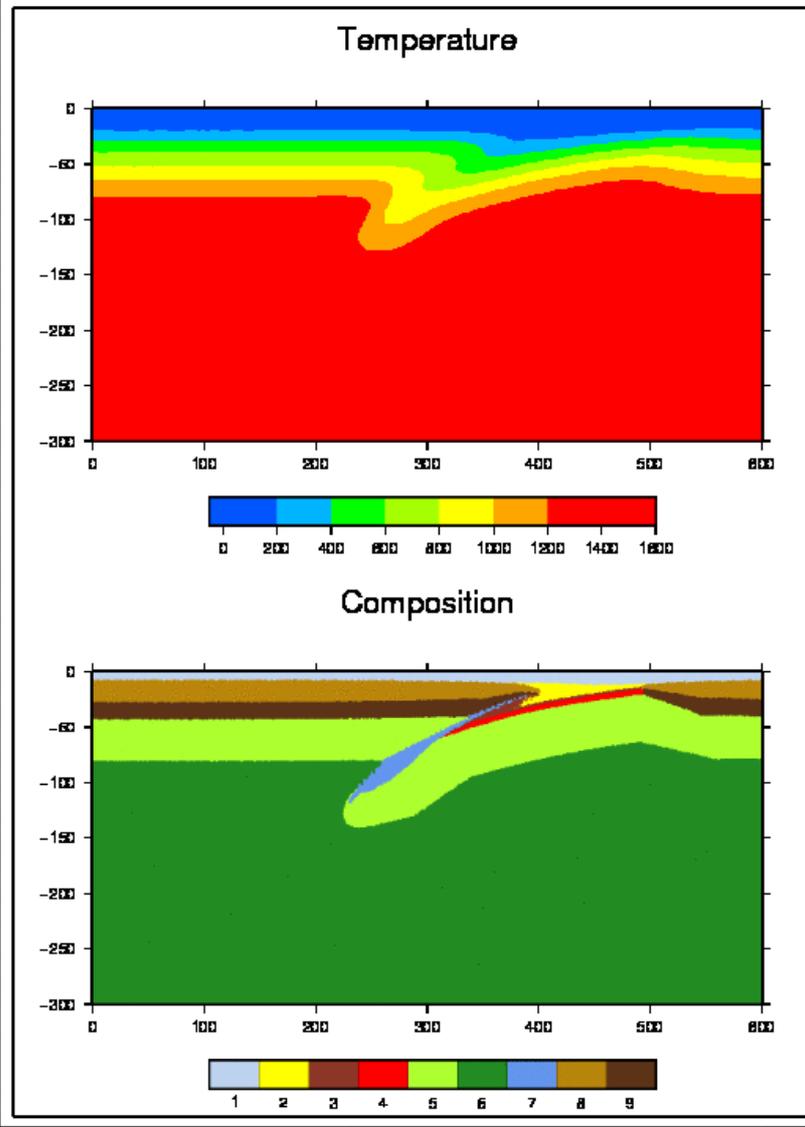


Figura 42. Aplicatii online. ContinentCollision. Model A1

Continental Collision - 0.2863 Ma

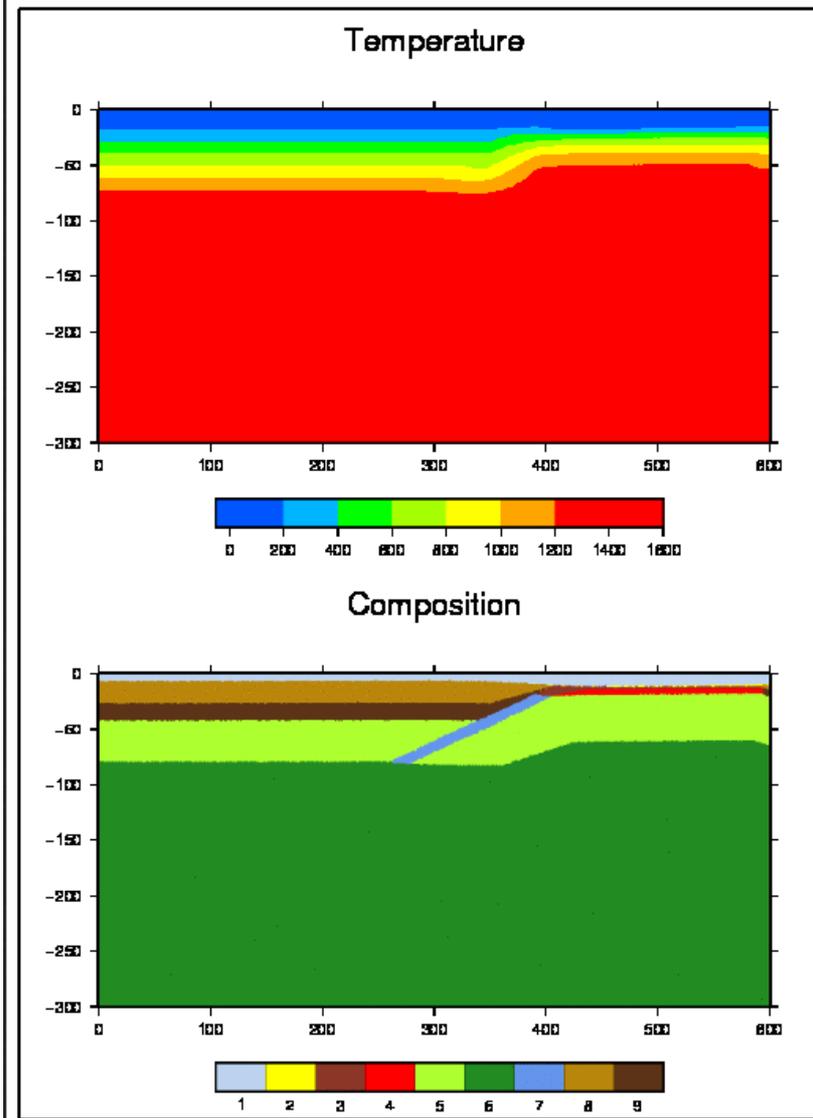


Figura 43. Aplicatii online. ContinentCollision. Model A2

Continental Collision – 17.8687 Ma

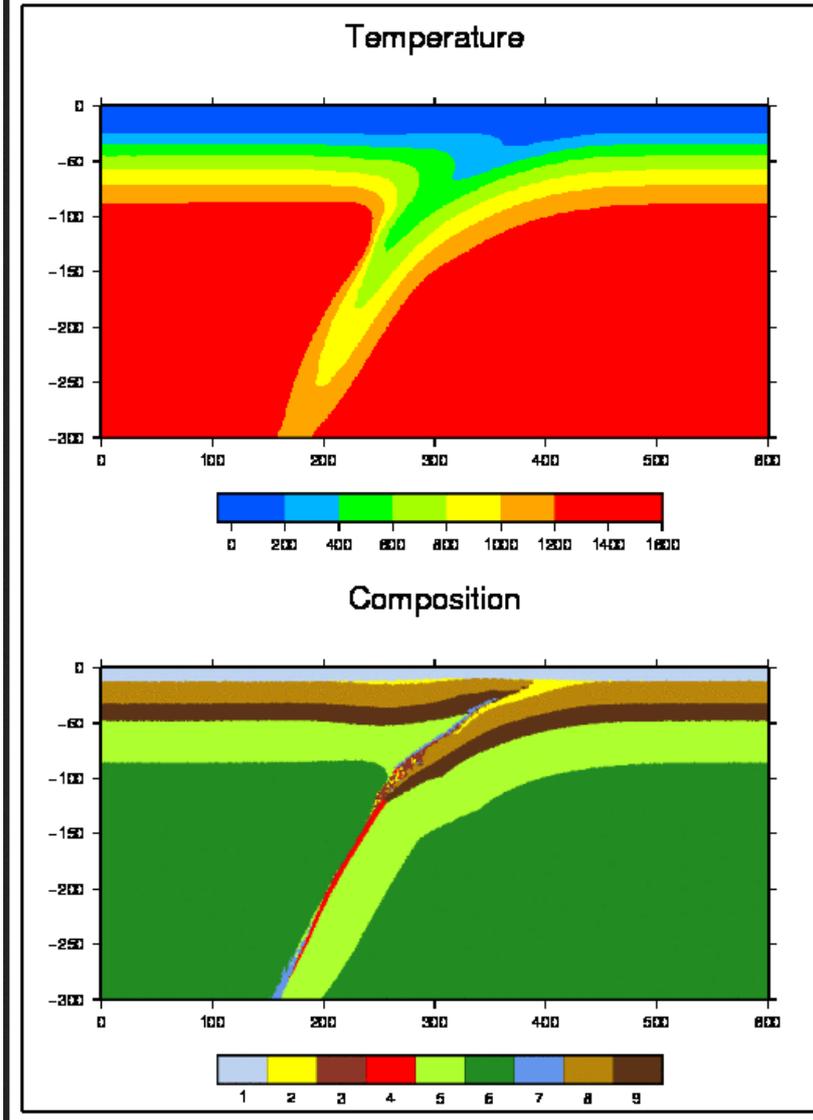


Figura 44. Aplicatii online. ContinentCollision. Model A3

Continental Collision – 8.3737 Ma

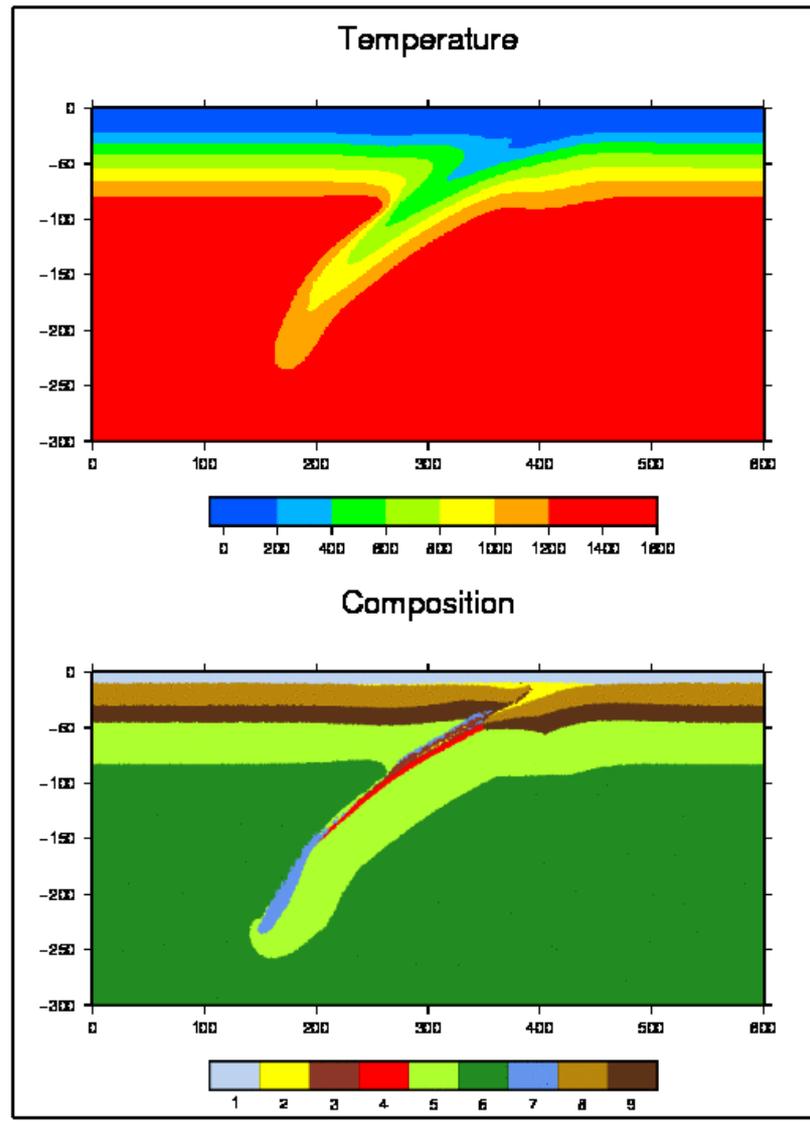


Figura 45. Aplicatii online. ContinentCollision. Model B1

Continental Collision – 0.0000 Ma

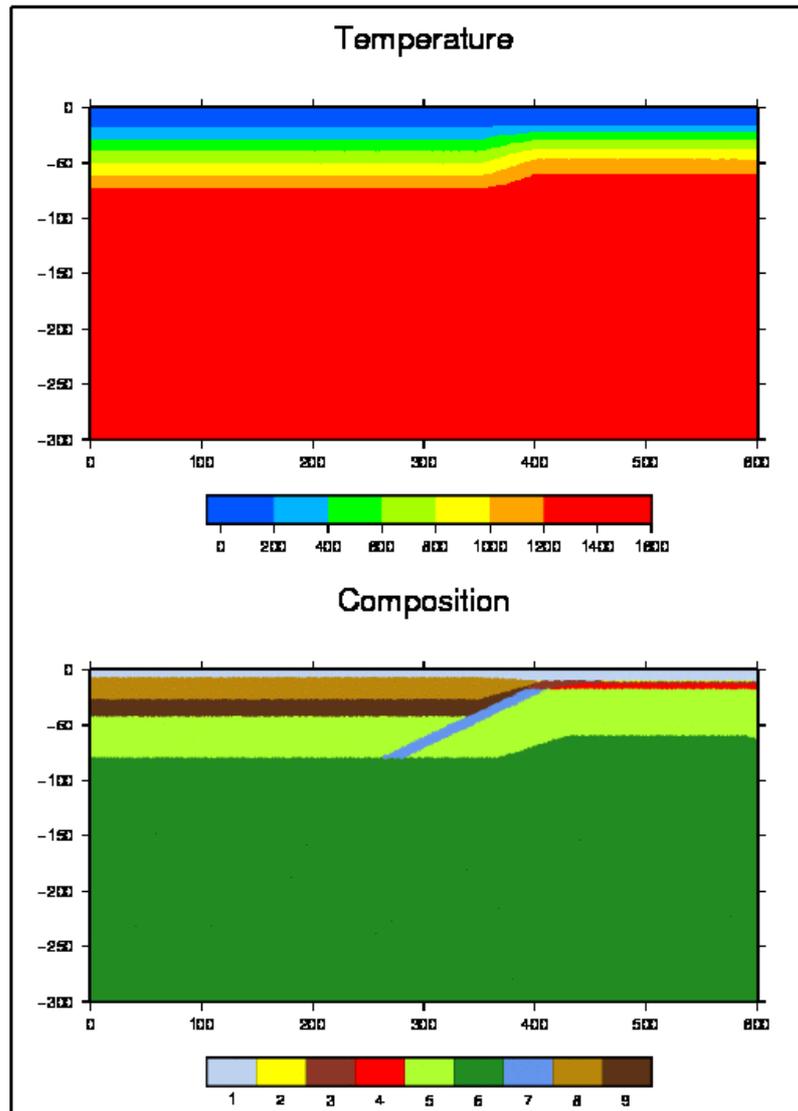


Figura 46. Aplicatii online. ContinentCollision. Model B2

Continental Collision - 8.3763 Ma

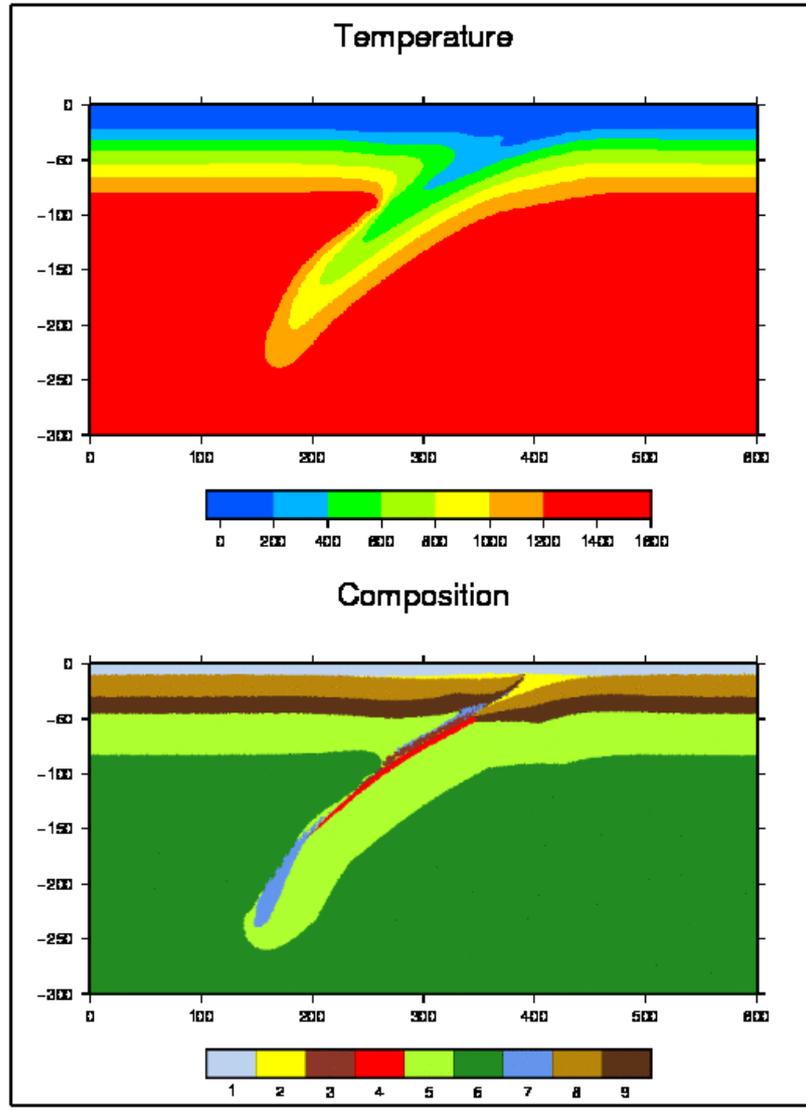


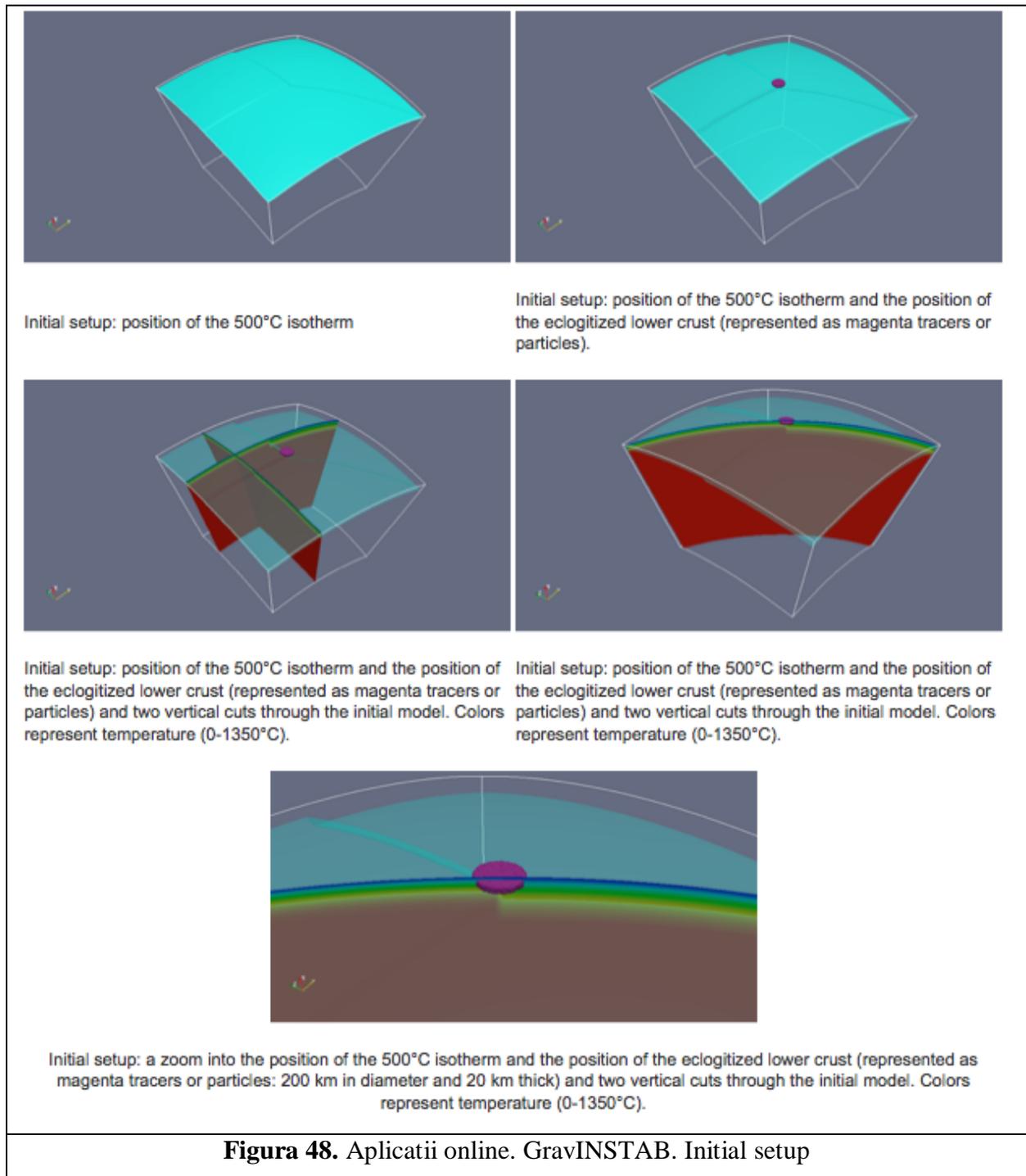
Figura 47. Aplicatii online. ContinentCollision. Model B3

6.3. APLICATIA GEOMODELS - GravINSTAB

Delaminarea litosferica datorita anomaliei de densitate din crusta inferioara (eclogitizare)

Este cunoscut faptul ca mantaua litosferica este mai densa decat astenosfera in cazul in care este incalzita la aceeasi temperatura si ca atare devine instabila din punct de vedere gravitational. In cazul in care intervine o compresiune tectonica orizontala intre doua, sau mai multe blocuri tectonice, asa cum este cazul zonei seismogene Vrancea, instabilitatea gravitationala poate sa sporeasca ingrosarea litosferica. In acelasi timp, partea inferioara a crustei continentale se poate eclogitiza declansand astfel instabilitatea gravitationala. Folosind pachetul de elemente finite CitcomS.py Version 3.0.1 (*Tan et al., 2006*), pus la dispozitie de catre Infrastructure for Geodynamics (CIG) (<http://geodynamics.org>), s-a construit un model numeric in care la intersectia celor trei blocuri tectonice aferente zonei Vrancea s-a introdus o regiune eclogitizata sub forma unui disc cu raza de 100 km si grosimea de 20 km, situat la adancimea de 20 km. Calculele numerice s-au efectuat intr-o regiune sferica (θ , ϕ , r), unde θ reprezinta latitudinea, ϕ longitudinea si r raza terestra. Adancimea modelului este de 1900 km, iar in latitudine si longitudine modelul se extinde 28° . Acest model este impartit in 129 de elemente in latitudine si longitudine, si 65 de elemente in adancime, astfel incat elementele finite aferente acestui model au dimensiunea de 25x25x25 km. Conditiiile la frontiera sunt urmatoarele: la suprafata si in adancime, limitele sunt alunecare libera (free slip), iar pe lateral conditiile la frontiera sunt de tipul reflectiv. Structura termica initiala corespunde unui model multistrat (a se vedea figurile de mai jos), compartimentele corespunzatoare zonelor vechi si groase avand varsta litosferica de 200 si 130 Myr, iar compartimentul tanar de 50 Myr. Mantaua este impartita in patru straturi concentrice dupa cum urmeaza: litosfera (grosime variabila), mantaua superioara, zona de tranzitie (410-670 km), si o portiune din mantaua inferioara (670-1900 km). Litosfera in cele trei compartimente are o grosime variabile de la 100 km la 160-200 km. Crusta eclogitizata are un exces de densitate de 600 kg/m³ si se poate identifica in modele prin particule (tracers).

Aplicatia GravINSTAB prezinta conditiile initiale impuse modelului asa cum au fost explicate mai sus (figura 48).



Aplicatia GravINSTAB prezinta doua optiuni : MODELE/MODELS in care sunt analizate modele pentru diferiti pasi de timp (figura 49) si Interactive3D (figura 50) in care utilizatorul interactioneaza direct cu modelul.

APLICAȚII @NLINE...GEOMODELS...GravINSTAB...Modele
Infrastructură Cibernetică pentru Studii Geodinamice Relaționate cu Zona Seismogenică Vrancea

GravINSTAB - Delaminare litosferică datorată anomaliilor de densitate din crusta inferioară (eclogitizare)

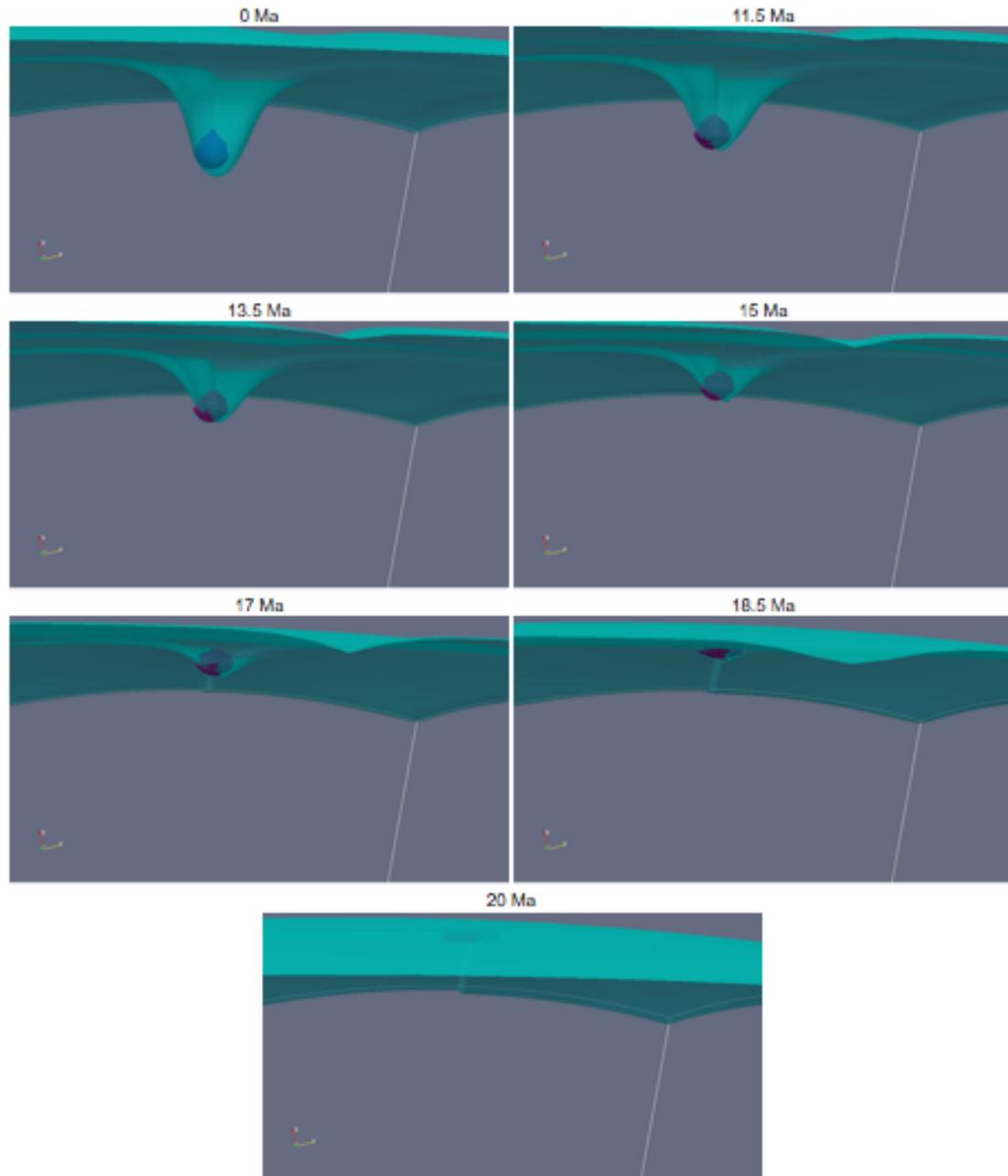
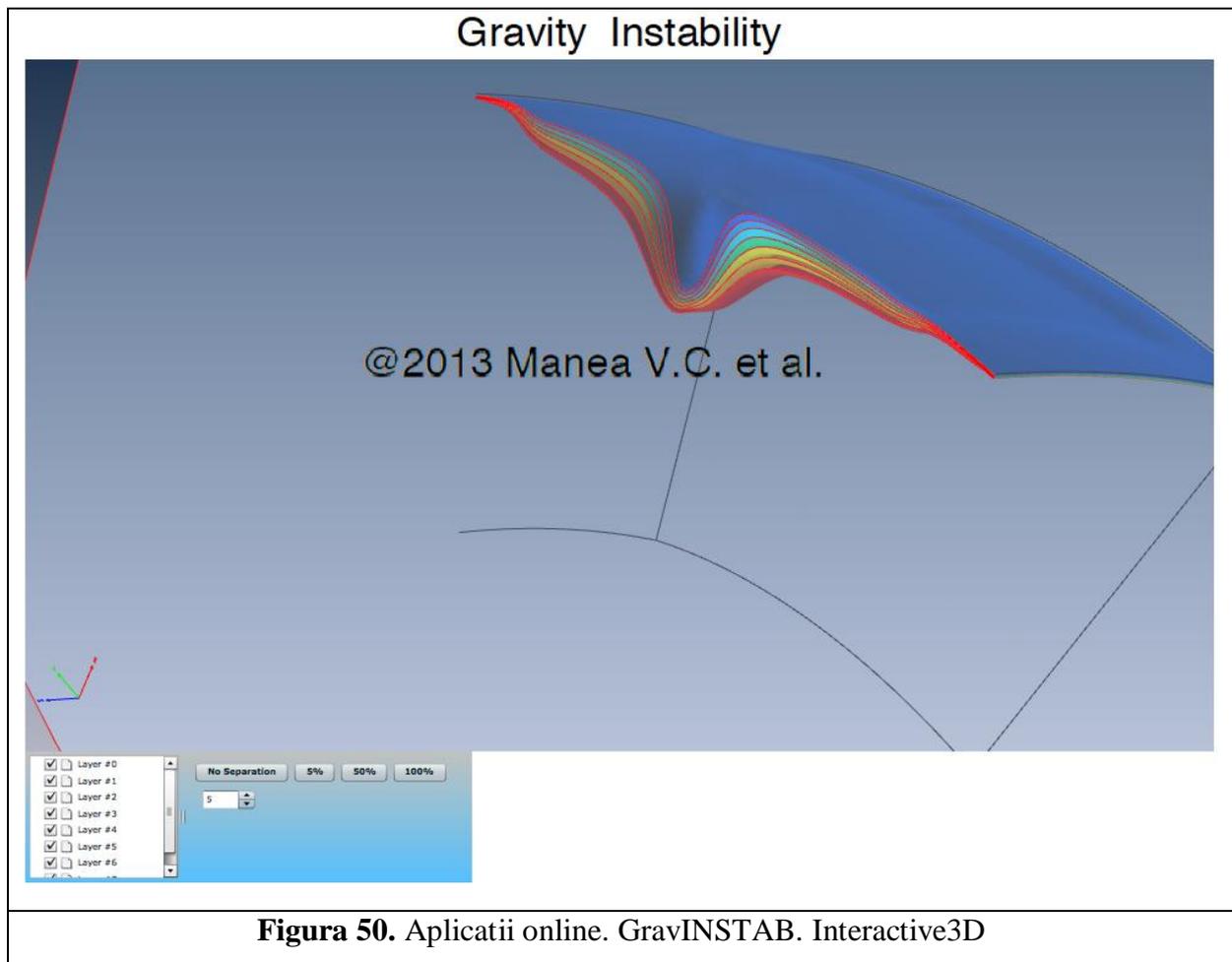


Figura 49. Aplicații online. GravINSTAB. Modele



In cazul optiunii Interactive3D principiul este acelasi ca in cazul optiunii Interactive3D din aplicatia PlumeIMPACT. Se interactioneaza cu datele numerice continute in documentul PDF fie descarcand documentul direct pe calculatorul personal, fie online. In ambele cazuri, utilizatorul trebuie sa aiba o versiune recenta de Adobe Reader.

6.4. APLICATIA GEOMODELS - SlabDETACHMENT

Desprinderea slabului in urma incetarii subductiei.

Unul dintre scenariile geodinamice legate de zona Vrancea este acela al unei zone de subductie aflata in ultima sa faza de evolutie. In acest scenariu, evolutia neotectonica a Carpatilor este controlata in principal de catre subductia NW a unei placi oceanice. Cand continentul European a inceput sa intre in subductie, flotatia pozitiva a acestuia a dus la incetarea subductiei dupa o anumita perioada de coliziune continentală. Varsta impingerii in zona panzelor care fac parte din prisma acretionara este de cca. 13 Ma in partea de nord si de cca. 10 Ma in partea de sud est. Aceasta distributie sugereaza faptul ca aceasta coliziune a inceput in partea de nord a arcului Carpatic in timp ce in partea de sud subductia placii oceanice avea inca loc. In modelele numerice prezentate mai jos s-a folosit acest scenariu tectonic ca si conditie la frontiera pentru partea superioara a modelului. Rezultatele modelarii sunt prezentate mai jos, acestea intinzandu-se pe o perioada geologica de 30 Ma. Folosind pachetul de elemente finite CitcomS.py Version 3.0.1 (Tan et al., 2006), pus la dispozitie de catre Infrastructure for Geodynamics (CIG) (<http://geodynamics.org>), s-a construit un model numeric ce incorporeaza scenariul de reconstructie tectonica descris mai sus. Calculele numerice s-au efectuat intr-o regiune sferica (θ , ϕ , r), unde θ reprezinta latitudinea, ϕ longitudinea si r raza terestra (Figura 51). Adancimea modelului este de 1900 km, iar in latitudine si longitudine modelul se extinde 14° . Acest model este impartit in 129 de elemente in latitudine si longitudine, si 129 de elemente in adancime, astfel incat elementele finite aferente acestu model au dimensiunea de $12 \times 12 \times 12$ km. Latimea placii oceanice si a litosferei ingrosate este de ~ 500 km. In stanga si in dreapta aceste zone, modelul este reprezentat de o zona de manta (fara litosfera). Cele doua regiuni cubice sunt amplasate in aceasta zona, si au dimensiunea de $100 \times 100 \times 100$ km si sunt situate la adancimea de 100 km (la partea superioara).

APLICAȚII @NLINE...GEOMODELS...SlabDetachment

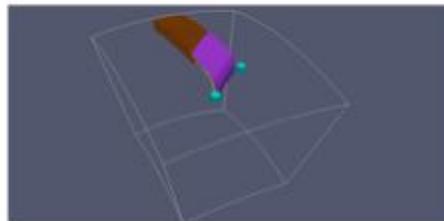
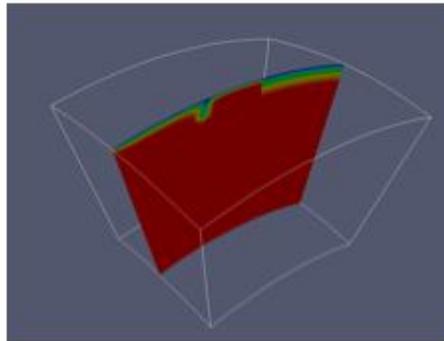
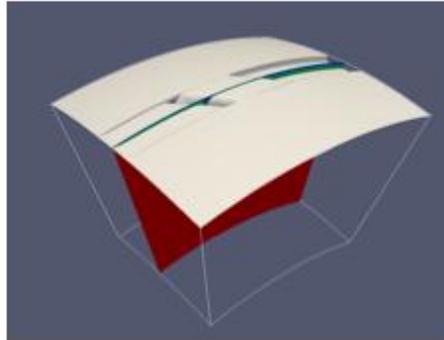
Infrastructură Cibernetică pentru Studii Geodinamice Relaționate cu Zona Seismogenică Vrancea

Slab Detachment - Desprinderea slabului în urma încetării subductiei

Model setup and boundary conditions for 4D slab detachment model.

Using the finite element package CitcomS.py Version 3.0.1 (Tan et al., 2006) available from the Computational Infrastructure for Geodynamics (CIG) (<http://geodynamics.org>), the computations are performed within a 3D spherical domain (θ, φ, r), where θ is latitude, φ is longitude and r is radius (Fig. 1). The inner radius corresponds to a depth of 1900 km, the outer radius the surface of the Earth. The span in latitude and longitude is 23° and 28° . This domain is evenly divided into 129 elements in the radial dimension and 150×257 elements in areal (i.e., latitude and longitude) dimension, corresponding to a $15 \times 17 \times 12$ km resolution. The boundary conditions are as follows. The top boundary has an imposed velocity boundary condition corresponding to the movement of the tectonic plates in the Panonian region since 30 Ma. The small oceanic plate subducts at 1.5 cm/yr, and the overriding plate at the same rate. The top and bottom boundaries are assumed to be isothermal. The bottom is free slip, and the sides are reflecting. The initial thermal structure is described by a multiple age thermal boundary layer (see Fig. 1) with old lithosphere as a 200 Myr old plate and young lithosphere as 10 Myr old. This background mantle is divided into four layers: lithosphere (variable thickness), upper mantle (variable thickness), transition zone (410 - 670 km) and part of lower mantle (670 - 1300 km). The lithosphere has a variable thickness, ranging from 100 km for young lithosphere to 100 - 200 km for the oldest region. The slab surface is modeled using particle tracers (see purple particles in the figures). Tracers' velocities are calculated by interpolating the eight nodal velocities with bilinear shape functions. Tracers are advected using the mid-point method (2nd order accuracy).

Initial SETUP

**Figura 51.** Aplicații online. SlabDETACHMENT. Initial Setup

Aplicatia SlabDETACHMENT are trei optiuni: SIDE VIEW (figura 52), TOP VIEW (figura 53) si Interactive3D (figura 54). Primele doua optiuni prezinta diversi pasi de timp pentru modelele analizate. Se utilizeaza particule pentru evidentierea curgerii diferitelor materiale considerate in model (slab, manta, etc.).

In cazul optiunii Interactive3D principiul este acelasi ca in cazul optiunii Interactive3D din aplicatia PlumeIMPACT. Se interactioneaza cu datele numerice continute in documentul PDF fie descarcand documentul direct pe calculatorul personal, fie online. In ambele cazuri, utilizatorul trebuie sa aiba o versiune recenta de Adobe Reader.

Slab Detachment - Desprinderea slabului în urma încetării subducției - evoluția unui model 4D pentru o perioadă de 30Myr

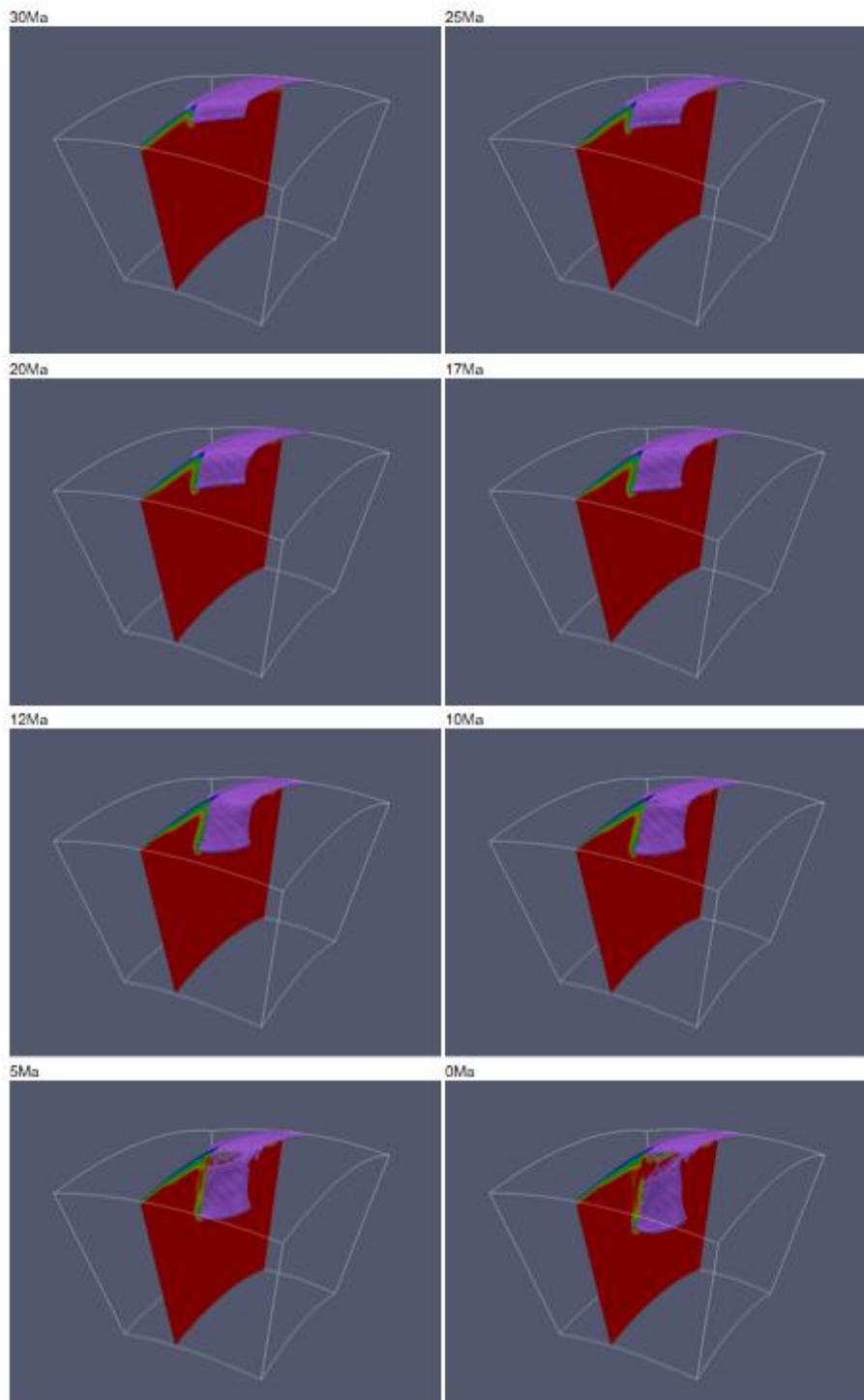


Figura 52. Aplicații online. SlabDETACHMENT. Side View

Slab Detachment - Desprinderea slabului în urma încetării subducției - evoluția unui model 4D pentru o perioadă de 30Myr

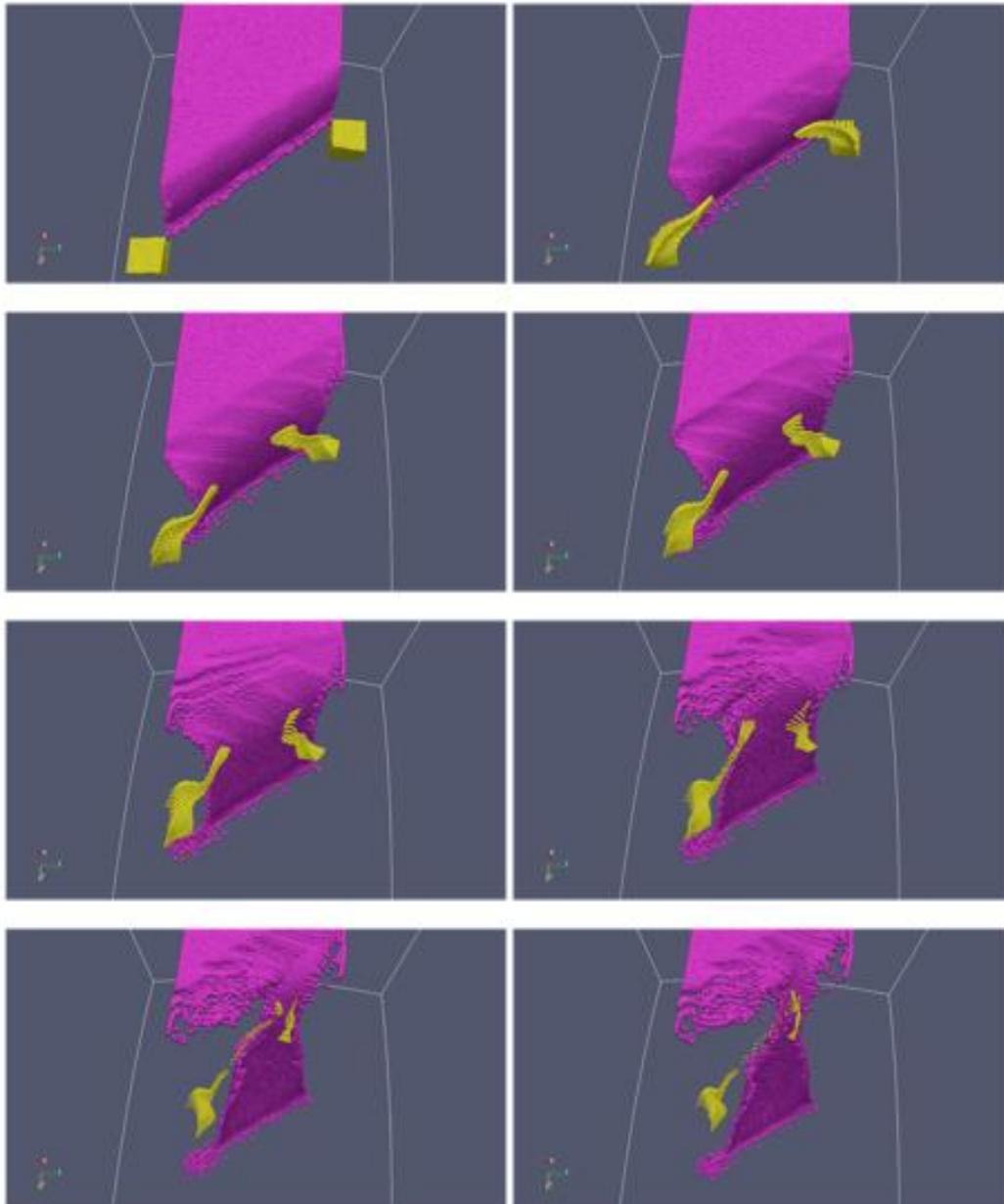


Figura 53. Aplicații online. SlabDETACHMENT. Top View

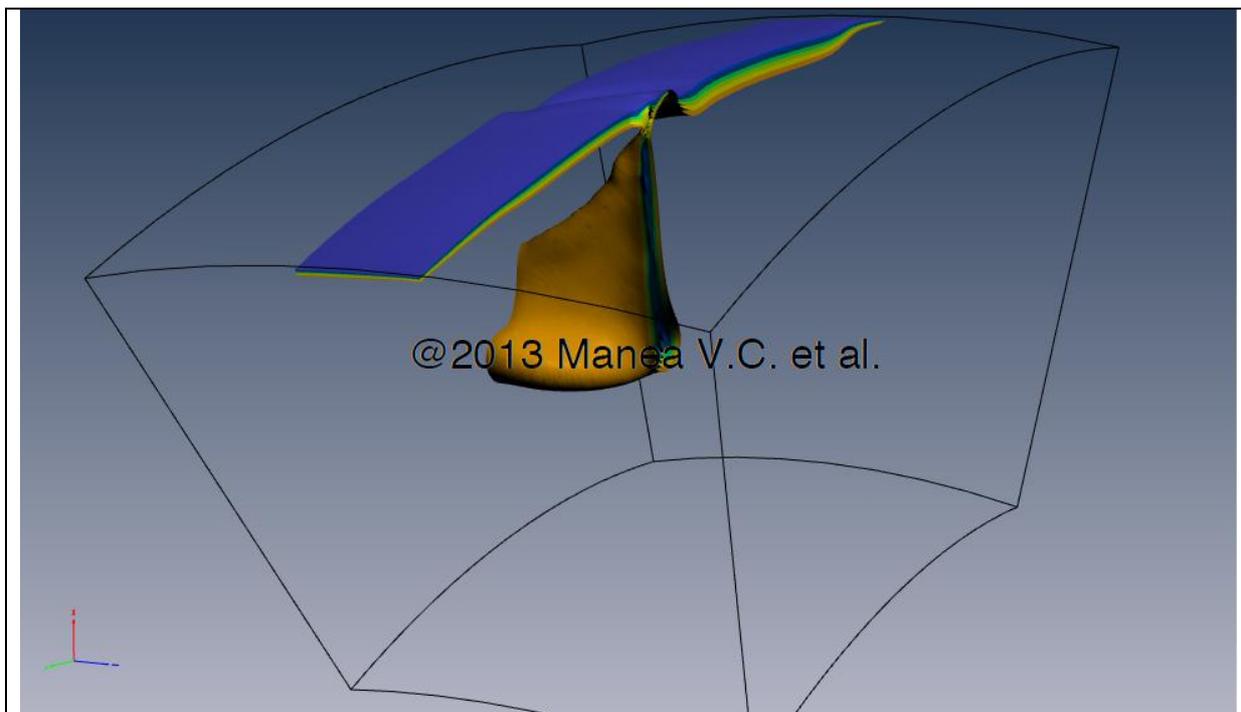


Figura 54. Aplicatii online. SlabDETACHMENT. Interactive3D

7. BIBLIOGRAFIE

- Besutiu, L., 2001. Vrancea active seismic area: a continental unstable triple junction?: Rev. Roum. Géophys., 45, 59-72
- Knapp, J.H., Knapp, C.C., Raileanu, V., Matenco, L., Mocanu, V., Dinu, C., 2005. Crustal constraints on the origin of mantle seismicity in the Vrancea Zone, Romania: the case for active continental lithospheric delamination. *Tectonophysics* 410, 311-323.
- Besutiu, L., 2003. Plate tectonics on the Romanian territory. Dynamics and some seismotectonic consequences: in Hain, V.E., Gherasimov, M.E. (Eds), *Probleme geodinamice și neftegazonice în regiunea Tchernomorskovo-Kaspiiskovo*, p.19-23, Simferopol
- Cloetingh, S.A.P.L., Burov, E., Matenco, L., Toussaint, G., Bertotti, G., Andriessen, P.A.M., Wortel, M.J.R., Spakman, W., 2004. Thermo-mechanical controls on the mode of continental collision in the SE Carpathians (Romania). *Earth and Planetary Science Letters*, 218, 57-76.
- Enescu, D., 1992. Lithosphere structure in Romania. I. Lithosphere thickness and average velocities of seismic waves P and S. Comparison with other geophysical data. *Revue Roumaine de Physique*, 37, 623-639.
- Girbacea, R., Frisch, W., 1988. Slab in the Wrong place; Lower lithospheric mantle delamination in the last stage of the Eastern Carpathian subduction retreat. *Geology*, 26, 611-614.
- Gwirtzman, Z., 2002. Partial detachment of a lithospheric root under the southeast Carpathians: toward a better definition of the detachment concept. *Geology*, 30, 51-54.
- Ismail-Zadeh, A.T., Keilis-Borok, V.I., and Soloviev, A.A., 1999. Numerical modeling of earthquake flows in the southeastern Carpathians (Vrancea): Effect of a sinking slab. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 111, 267-274.
- Ismail-Zadeh, A.T., Schubert, G., Tsepelev, I., and Korotkii, A., 2008. Thermal evolution and geometry of the descending lithosphere beneath the SE-Carpathians: an insight from the past. *Earth and Planetary Science Letters*, 273, 68-79.
- Knapp, J.H., Knapp, C.C., Raileanu, V., Matenco, L., Mocanu, V., Dinu, C., 2005. Crustal constraints on the origin of mantle seismicity in the Vrancea Zone, Romania: the case for active continental lithospheric delamination. *Tectonophysics* 410, 311-323.
- Lorinczi, P., Houseman, G.A., 2008. Lithospheric gravitational instability beneath Southeast Carpathians. *Tectonophysics*, doi: 10.1016/j.tecto.2008.05.024
- Martin, M., Wenzel, F., and the CALIXTO working group, 2006. High-resolution teleseismic body wave tomography beneath SE-Romania-II. Imaging of a slab detachment scenario. *Geophysical Journal International*, 164, 579-595.

- Oncescu, M.C., Marza, V.I., Rizescu, M., si Popa, M., 1999. The Romanian earthquake catalogue between 1984-1996. In: Vrancea Earthquakes: tectonics, Hazard, and Risk Mitigation, Wenzel, F., Lungu, D., and Novak, O. (eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 43-47.
- Wortel, M.J.R., Spakman, W., 2000. Subduction and slab detachment in the Mediterranean-Carpathian region. *Science*, 290, 1910-1917.
- Cloetingh, S., Bada, G., Matenco, L., Lankreijer, A., Horvath, F., and Dinu, C., 2006. Thermo-mechanical modelling of the Pannonian-Carpathian system: Modes of tectonic deformation, lithoferic strength and vertical motions. In: Gee D. and Stephenson R. (eds). Geological Society, London, Memoirs, 32: European Lithosphere Dynamics, pp. 207-221. London: Geological Society, London.
- Cloetingh, S. and Ziegler, P.A., 2009. Tectonic models for the evolution of sedimentary basins. in: *Treatise of Geophysics, Vol. 6: Crust and lithosphere dynamics*, vol. ed.: Watts, A.B., editor-in-chief: Schubert, G., pp. 485-611.
- Horvath, F., 1993. Towards a mechanical model for the formation of the Pannonian Basin. *Tectonophysics* 226, pp:333-357.
- Horvath, F., Bada, G., Szafian P., Tari, G., Adam, A., and Cloetingh S., 2006. Formation and deformation of the Pannonian Basin: Constraints from observational data. In: Gee D. and Stephenson R. (eds). Geological Society, London, Memoirs, 32: European Lithosphere Dynamics, pp. 191-206. London: Geological Society, London.
- Lankreijer, A. 1998. Rheology and basement control on extensional basin evolution in Central and Eastern Europe: Variscan and Alpine-Carpathian-Pannonian tectonics. PhD Thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam, 158p.
- Reguzzoni, M. and Sampietro, D., 2012. Moho estimation using GOCE data: a numerical simulation. In: *International Association of Geodesy Symposia, "Geodesy for Planet Earth"*, S.C. Kenyon, M.C. Pacino, U.J.Marti (eds), Vol. 136, Springer-Verlag, Berlin, pp. 205-214. DOI:10.1007/978-3-642-20338-1_25.
- Sanders, C.A.E., Andriessen, P.A.M., and Cloetingh, S.A.P.L., 1999. Life cycle of the East Carpathian orogen: Erosion history of a doubly vergent crustal wedge assessed by fission track thermochronology. *Journal of Geophysical Research* 104, pp. 29095-29112.
- Sandulescu M., 1984. *Geotectonics of Romania*. Bucharest, Editura Tehnica.
- Smith, W. H. F., and D. T. Sandwell, 1997. Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings, *Science*, v. 277, p. 1957-1962