

# Raport științific

## Obiectivul 1. Modelarea curgerii topiturii sub influența unui camp electromagnetic special (EMF) într-o configurație izotermala.

Idea principală a acestui proiect este să obținem o rotație a topiturii într-un creuzet rectangular folosind o configurație specială de camp electromagnetic. Creuzetul cu topitura de siliciu se plasează într-un camp magnetic vertical și un camp electric este lăsat să treacă prin topitura cu ajutorul a 2 sau mai mulți electrozi. În figura 1 sunt prezentate două astfel de configurații (una cu 2 și una cu 4 electrozi).

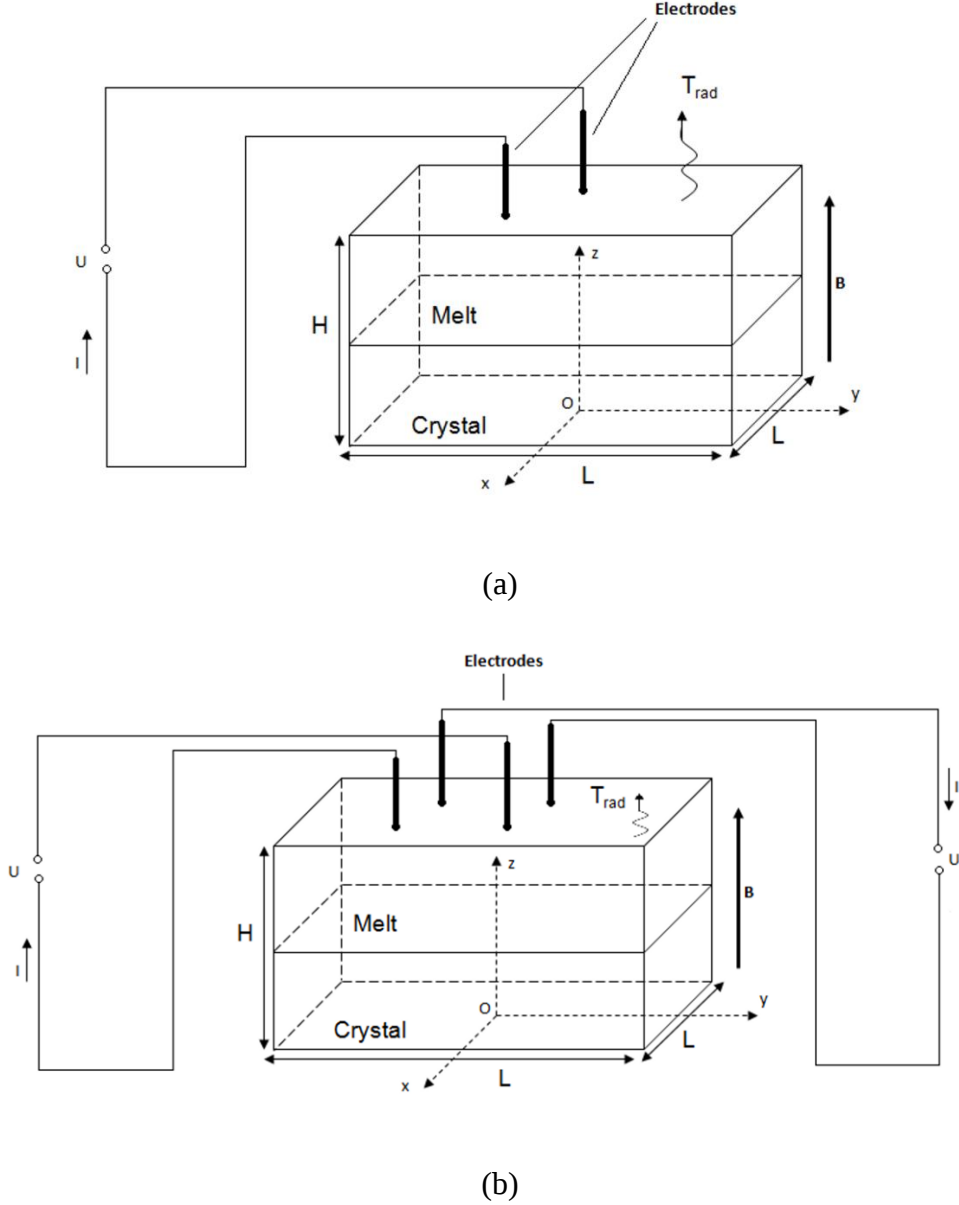


Figura 1. Configurații de camp electromagnetic ce urmează a fi investigate.

Curgerea topiturii este descrisă de ecuațiile Navier-Stokes și reflectă conservarea masei, impulsului și căldurii pentru cazul 3-dimensional. În plus se consideră aproximația Boussinesq pentru curgerea naturală ( $\vec{f}_g = \rho(T_{ref})\vec{g} - \beta(T - T_{ref})\rho\vec{g}$ ) și densitatea de forță Lorentz ( $\vec{f}_L = \vec{j} \times \vec{B}$ ) pentru acțiunea câmpului magnetic:

$$\nabla \vec{u} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho(\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u} - \mu \nabla^2 \vec{u} = -\nabla p - \vec{f}_g + \vec{f}_L \quad (2)$$

$$\rho C_p \left[ \frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{u} \nabla) T \right] - k \nabla^2 T = 0 \quad (3)$$

Unde  $\rho$  este densitatea,  $T_{ref}$  este temperatura de referinta,  $\vec{g}$  este acceleratia gravitacionala,  $\beta$  este coeficientul de expansiune termica,  $\vec{j}$  este densitatea de curent electric,  $\vec{B}$  este inductia magnetica,  $\vec{u}$  este viteza topiturii,  $C_p$  este capacitatea calorica si  $k$  este conductivitatea termica.

Vitezele fluidului de-a lungul frontierelor corespunzătoare creuzetului și cristalului sunt fixate la  $\vec{v} = 0$ . De-a lungul suprafeței topiturii este impusa condiția de “suprafata libera”. Temperaturile de-a lungul peretelui vertical lateral și la bază sunt fixate. La suprafața liberă s-a aplicat un schimb radiativ cu temperatura ambientală de  $T_{rad} = 1713K$ .

La interfața lichid-solid se consideră generarea de căldură latentă pentru viteza de cristalizare considerată:

$$k_s \nabla T|_s - k_L \nabla T|_L = u_g \rho_s \Delta H \quad (4)$$

unde  $k_s$  și  $k_L$  reprezintă conductivitățile termice din solid și lichid,  $u_g$  este viteza de creștere setată la 10 mm/h pentru simulările noastre și  $\Delta H$  este căldura latentă.

Pentru calculul fortei Lorentz s-a introdus densitatea de curent indusa in topitura de campul magnetic stationar B:

$$\vec{j} = \sigma (-\nabla \Phi + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (5)$$

In ecuatia (5)  $\sigma$  este conductivitatea electrica si  $\Phi$  este potentialul scalar obtinut in urma rezolvarii ecuatiei:

$$\Delta \Phi = \nabla (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (6)$$

Cu

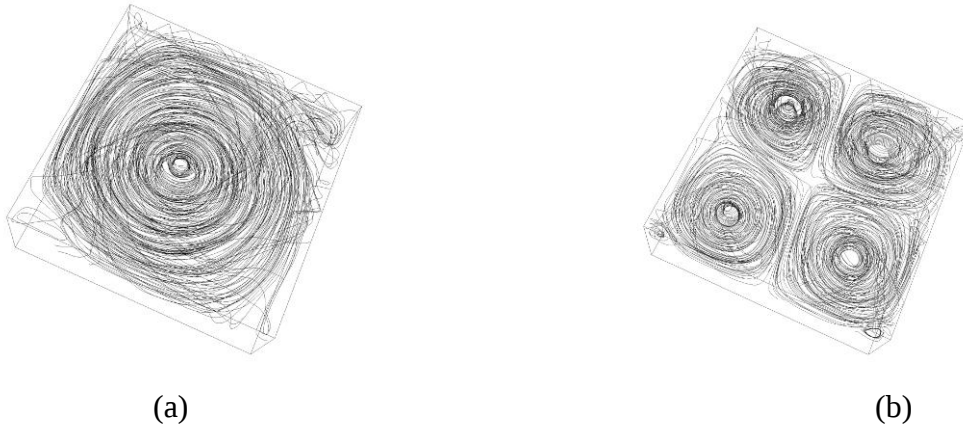
$$\nabla \vec{j} = \mathbf{0} , \quad (7)$$

Pentru a genera un curent electric in topitura doua situatii au fost considerate: in primul rand, asa cum se vede din figura 1a, curentul electric patrunde in topitura prin doi electrozi plasati la suprafata topiturii si conectati la o sursa continua de tensiune. In al doilea scenariu, doua perechi de electrozi sunt folositi asa cum se vede in figura 1.b. Electrozii se considera avand un diametru mic, astfel efectul lor asupra campului vitezelor si temperaturii se poate neglija.

Programul STHAMAS3D a fost dezvoltat astfel incat sa permita rezolvarea numerica a modelului matematic de mai sus. In principal a fost dezvoltata o subrutina care sa ia in considerare conditiile pe frontiera datorate prezentei electrozilor.

Au fost realizate doua rulari test:

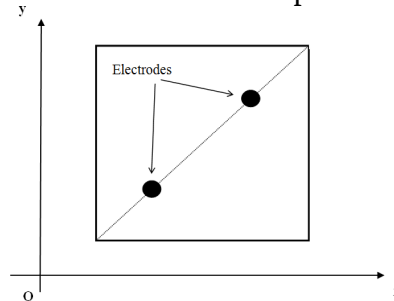
- una pentru configuratia cu 2 electrozi Fig.2.a, campul magnetic fiind 10 mT si curentul electric 10A
- una pentru configuratia cu 4 electrozi, Fig.2.b, campul magnetic fiind 10 mT si curentul electric 2A



(a) (b)  
Figura 2. Structuri de curgere in cazul a 2 electrozi(a) si patru electrozi(b)

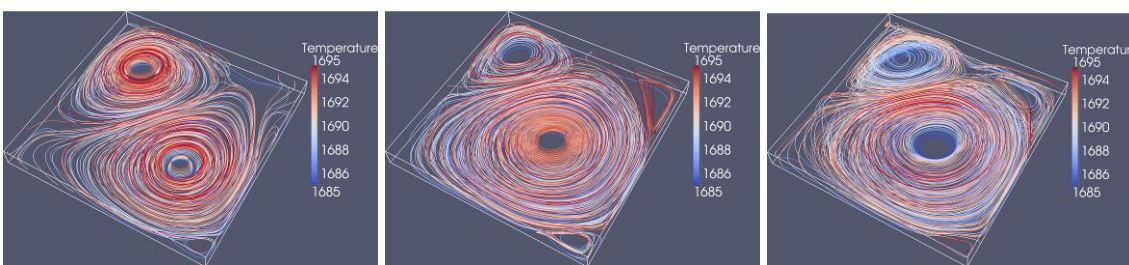
Se observa ca in urma aplicarii campului electromagnetic, rezulta o rotatie a topiturii, caracterizata de o singura celula de convecție in cazul a 2 electrozi si 4 celule de convecție in cazul a 4 electrozi.

Modelul numeric dezvoltat a fost folosit pentru a studia curgerea topiturii pentru diferite valori ale campurilor aplicate, in cazul configuratiei cu doi electrozi dispusi simetric (fig.3.).



**Figura3.** Dispunerea electrozilor in sectiune orizontala.

Cel mai semnificativ rezultat obtinut arata ca intensitatea curentului electric este un parametru de luat in considerare pentru controlul structurii de convecție. Astfel, se observa ca, marind intensitatea curentului electric, structura curgerii se schimba din doua celule de convecție aproximativ simetrice, intr-o structura in care una dintre celule devine dominanta (fig.4).



(a)  $I=2A$

(b)  $I=5A$

(c)  $I=10A$

**Figura 4.** Influenta intensitatii curentului electric asupra convecției topiturii

Pentru obținerea unei soluții reale pornind de la o soluție arbitrară folosind STHAMAS3D sunt necesare cel puțin 800 de secunde în timp real cu un pas de timp de 0.1 secunde. Ceea ce înseamnă un efort de calcul foarte mare pentru efectuarea de studii parametrice. De aceea, programul de simulare STHAMAS3D a fost modificat pentru a fi rulat pe unul dintre cele mai performante supercomputere BlueGene/P pus la dispoziție de Universitatea de Vest din Timișoara pentru efectuarea calculelor de înaltă performanță.

Supercomputerul BlueGene/P aflat la UVT are următoarele caracteristici:

- putere de calcul
  - 1x BG/P Rack
  - CPU: 1024x Quad-Core PowerPC-450 850Mhz;
  - RAM: 4GB/CPU
  - inter-connect: 3D-Torus network
- sistem de stocare
  - 2x I/O Nodes
  - 2x IBM DS3524 SAN's
    - HDD: 48x 320GB SAS
    - connectivity: 10GbE Ethernet

Rezultatele obținute în urma rulării au fost comparate cu cele obținute în urma rulării programului de simulare, în aceleași condiții, pe clusterul Nanosim al Facultății de Fizică din cadrul Universității de Vest din Timișoara. Nanosim este un cluster HP-AMD-Opteron 2.2 GHz (1 Gbit/s switched) cu 12 noduri de calcul.

Geometria pe care am utilizat-o constă din topitură și cristal de siliciu și are dimensiunile de  $38 \times 38 \times 40 \text{ cm}^3$ . Calculele tridimensionale dependente de timp au fost realizate cu programul software STHAMAS3D ale cărui librării și subrutine au fost adaptate pentru a rula atât pe Nanosim cât și pe supercomputerul BlueGene/P.

Domeniul de calcul este subîmpărțit în două blocuri, unul corespunzător topiturii și unul corespunzător cristalului. Pentru fiecare bloc avem 50 de noduri pe direcțiile x și y și 70 de noduri pe direcția z, însemnând că rețea de calcul constă din 350.000 de volume de control.

În STHAMAS3D pentru rezolvarea ecuațiilor dependente de timp sunt necesare mai multe iterații la fiecare pas de timp. În fișierul de input al parametrilor se poate seta numărul maxim de iterații ce se efectuează la fiecare pas de timp. Dacă criteriul de convergență este atins înainte de efectuarea numărului maxim de iterații programul trece la următorul pas timp. Pentru testele efectuate, timpul de rulare s-a măsurat după 1000 de iterații și s-au luat în considerare 10 și 25 de pași intermediari.

Rezultatele înregistrate pentru timpul de rulare pe cele două sisteme de calcul sunt prezentate în Figura 5.

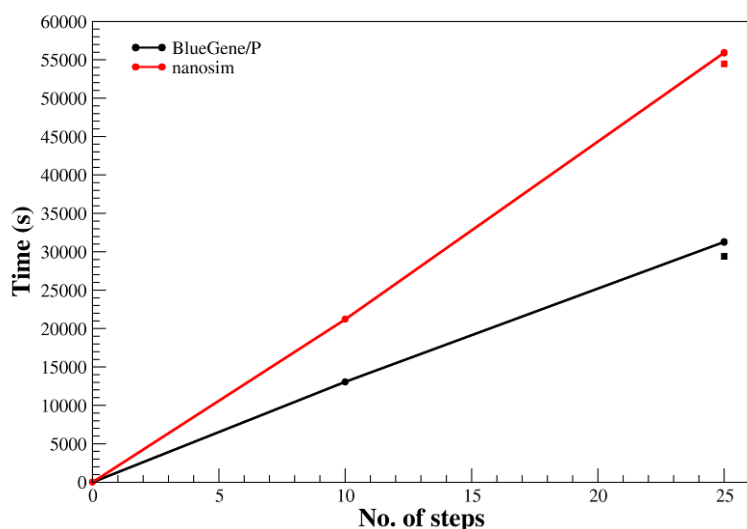


Figura 5. Timpul de rulare al programului STHAMAS3D pe diferite sisteme de calcul și în diferite condiții

Din Figura 5 se observă că dacă la fiecare pas de timp se efectuează 10 iterații intermediare, timpul de rulare pe Nanosim este de 21207,672 s, iar pe BlueGene/P este de 13048,5 s. Ceea ce înseamnă că, prin adaptarea codului pentru a fi rulat pe BlueGene/P, se obține o scădere a timpului total de rulare de aproape 40%.

Dacă, însă, la fiecare pas de timp se efectuează 25 de pași intermediari, așa cum este de așteptat timpul de calcul crește, dar și diferența dintre timpul total de rulare înregistrat pe BlueGene/P și cel înregistrat pe Nanosim este mai mare. În acest caz diferența, după 1000 de iterații efectuate pe supercomputerul BlueGene/P codul este mai rapid cu 44% față de rularea, cu aceeași parametri, a programului de simulare STHAMAS3D pe clusterul Nanosim.

În cazurile prezentate mai sus, rezultatele simulărilor sunt scrise la fiecare 100 de iterații. Este cunoscut faptul că scrierea datelor în fișierele de output ar putea să consume mult timp de calcul, de aceea s-a studiat și un caz în care rezultatele simulărilor au fost scrise o singură dată, la sfârșitul celor 1000 de iterații. Valorile înregistrate în acest caz sunt marcate cu pătrate în Figura 5. Se observă că, atât pe BlueGene cât și pe Nanosim, timpul de rulare, după 1000 de iterații scade față de cazul în care datele se scriu și la pași de timp intermediari. Această scădere nu este, însă, foarte semnificativă și de aceea proporția dintre timpul de rulare înregistrat pe cele două sisteme se păstrează aproape la fel ca în cazurile precedente.

Pentru a valida modelul numeric, rezultatele numerice au fost comparate cu rezultatele experimentale obținute în experimentul model dezvoltat în cadrul obiectivului 2.

Geometria folosită în modelarea numerică constă într-un creuzet rectangular de  $7 \times 7 \times 5 \text{ cm}^3$  mărime. Creuzetul este umplut aliaj eutectic de GaInSn. Acest aliaj, datorită unei temperaturi joase de topire ( $\sim 11^\circ\text{C}$ ) este lichid la temperatura camerei și este de obicei folosit ca model în experimente cu fluide. Proprietățile de material folosite în modelarea numerică sunt listate în Tabelul 1:

| Proprietăți fizice        | Valoare              | Unitate de măsură           |
|---------------------------|----------------------|-----------------------------|
| Densitatea, $\rho$        | 6360                 | $\text{Kg/m}^3$             |
| Vâscozitate dinamică,     | $2.16 \cdot 10^{-3}$ | $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$ |
| Conductivitate electrică, | $3.2 \cdot 10^6$     | $\text{S/m}$                |

Un curent electric este injectat în topitură prin intermediul a doi electrozi plasați de-a lungul diagonalei simetric față de punctul central, la  $1/3$  și  $2/3$  din lungimea diagonalei din colțul stânga jos, după cum se poate observa și în Figura 6.

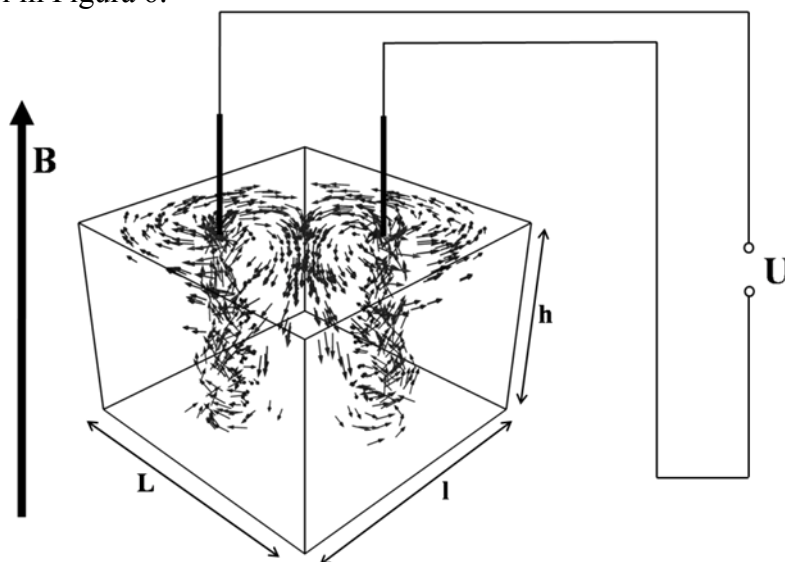


Figura 6. Reprezentarea schematică a modelului numeric

Această configurație este plasată într-un câmp magnetic vertical. Combinația dintre curentul electric și câmpul magnetic vertical generează o forță Lorentz care adaugă o componentă rotațională convecției fluidului.

Pentru a studia influența pe care câmpul electromagnetic o are asupra convecției topiturii pentru fiecare valoare a câmpului magnetic ( $B = 5, 10, 20, 30 \text{ mT}$ ) în modelările numerice efectuate s-a luat în considerare un interval pentru intensitățile curentului electric ( $I = 0.1, 0.5, 1, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 \text{ A}$ ). Pentru a obține o soluție realistă 500 s în timp real au fost simulate cu un pas de timp de 0.1 s pentru fiecare combinație de  $I$  și  $B$ . Pe ultimele 300 s s-a calculat o medie temporală (pentru a compara profilele vitezelor cu cele măsurate experimental). Simulările dependente de timp au fost realizate pe

supercomputerul BlueGene/P de la Centrul de Calcul de Înaltă Performanță (High Performance Computer Center) al Universității de Vest din Timișoara folosind o versiune paralelizată a STHAMAS3D.

## Modelul experimental

Pentru a valida rezultatele numerice, un model experimental a fost creat în cadrul Obiectivului 2. Un creuzet dreptunghiular din sticlă de  $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$ , care conține o topitură eutectică de GaInSn este plasat în interiorul unui electromagnet. Electromagnetul pe curent continuu în formă de C a fost construit pentru a obține un câmp magnetic staționar și cvasi-uniform în zona interioară. Ca și în simulările numerice, volumul total al topiturii este  $7 \times 7 \times 5 \text{ cm}^3$ , cu suprafața topiturii descoperită. Doi electrozi, fixați în capacul ce acoperă creuzetul, ating suprafața liberă a topiturii de GaInSn. Aceștia sunt plasați de-a lungul diagonalei simetric față de centru la  $1/3$  și  $2/3$  din lungimea diagonalei (Figura 7). Pentru a minimiza efectele asupra câmpurilor termice și de viteză la suprafața liberă, 2 electrozi cu vârf semisferic introduși în topitură imediat sub partea cilindrică (semisfera are 2 mm rază) au fost folosiți în acest studiu. Un curent electric continuu trece prin electrozi în topitură, care generează un efect de amestecare electromagnetică în conjunctură cu câmpul magnetic aplicat.

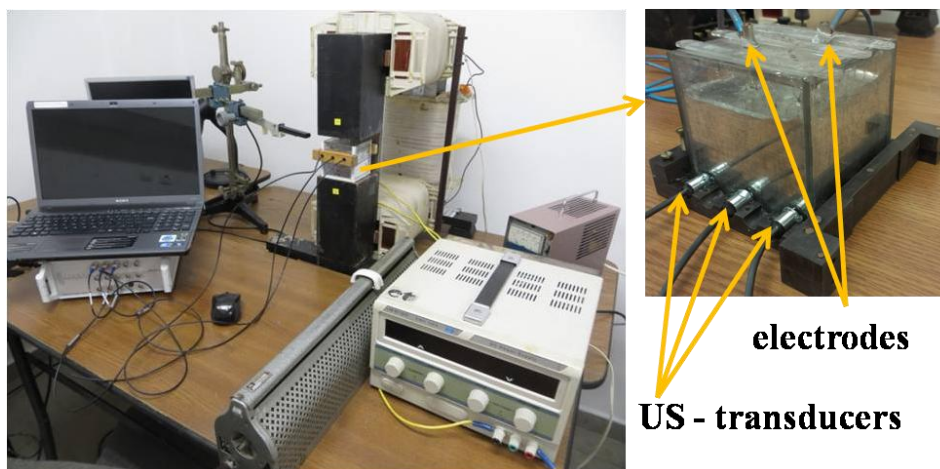


Figura 7. Montajul experimental al electromagnetului în formă de C în deschiderea căruia este plasat creuzetul; traductorii ultrasonici conectați la Velocimetrul DOP3010 sunt fixați perpendicular pe perețele creuzetului

Câmpul magnetic auto-indus de un electrod semisferic pentru cea mai mare valoare a curentului electric folosit în experiment, 5 A, și o rază a semisferei de aproximativ 2 mm, este:

$$B_{\text{self}} = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} = 0.5 \text{ mT}$$

Această valoare poate fi considerată neglijabilă în comparație cu câmpul magnetic considerat în acest studiu, care variază între 5 și 30 mT. Astfel, efectul acestui câmp magnetic nu a fost luat în considerare în modelările numerice.

Pentru a măsura profilele de viteză, metoda de velocimetrie Doppler cu ultrasunete a fost folosită, realizată cu aparatul comercial DOP3010 de la Signal Processing S.A., care a fost folosit cu succes în măsurători de curgeri în metale lichide. Metoda de velocimetrie Doppler cu ultrasunete folosită de DOP3010 este bazată pe tehnologia puls-ecou, ceea ce permite vizualizarea profilelor de viteză de-a lungul direcției de propagare a undelor ultrasonice în interiorul lichidului care curge prin auto-corelarea diferitelor ecouri ultrasonice recepționate după emiterea unor serii de pulsuri repetitive. Semnalul ultrasonic vine de la particule suspendate în lichid care sunt în calea razei ultrasonice. În cazul GaInSn, particulele de oxid de galiu depuse pe suprafața liberă sunt sursa ultrasunetelor reflectate. O îmbunătățire a semnalului ultrasonic a fost obținută prin amestecarea oxidului de galiu în topitură la înainte de începerea experimentului. Viteza a fost mediată peste o perioadă de 1200 s în timpul măsurătorilor experimentale.

S-au folosit 3 traductori ultrasonici de 4 MHz. Traductorii au fost poziționați perpendicular pe perețele exterior al creuzetului pe suport (vezi Figura 7). Cuplajul ultrasonic între senzori și perețele de sticlă a fost realizat prin folosirea unui gel ultrasonic standard. Acești senzori au fost plasați în trei poziții (stânga, mijloc, dreapta) de-a lungul unei linii orizontale. Traductorii, care sunt perpendiculari pe perețele creuzetului, măsoară componenta vitezei perpendiculară pe perete, care, prin convenție este negativă dacă fluxul este orientat către traductor și pozitivă dacă este orientat în sens invers. Un volum de măsurare este

definit lateral de divergența undei ultrasonice și axial de lățimea de undă de etalonare, care trebuie să corespundă la o lungime mai mare decât pulsul emis. Pentru aceste măsurători, dimensiunea axială a volumului de etalonare este 2.184 mm. Rezoluția dintre două puncte este dată de distanța dintre centrele a două volume consecutive de măsurare. Volumele de măsurare se suprapun, deoarece distanța dintre centrele a două volume este de aproximativ 10 ori mai mică decât lungimea lor axială. Traductoarele conțin un piezoelement de 5 mm în diametru, care dictează diametrul inițial al undei ultrasonice în regiunea apropiată care diverge la aproape 9.5 mm la 7 cm adâncime. Deci, poziția considerată a traductorului va fi aceea corespunzătoare axei centrale. Câmpul de viteză este astfel mediat în jurul axei traductorului, care este întotdeauna descrisă de un set de coordonate  $x$  și  $z$ .

Pentru această tehnică de măsurare, toate profilele prezintă de obicei artefacte de măsurare în regiunea apropiată a câmpului (aproximativ 10 mm pentru o topitură de GaInSn la 4.130 MHz, pentru un traductor cilindric cu un diametru de 5 mm).

## Rezultate

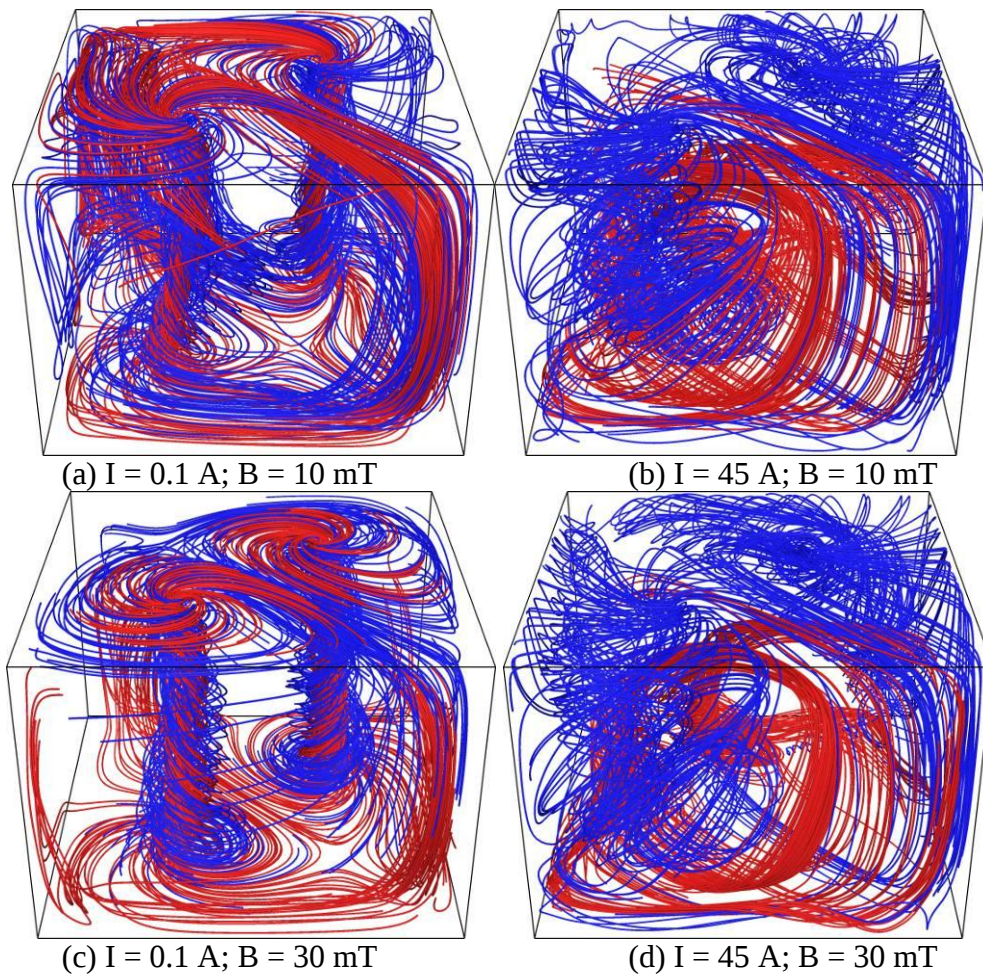
### Modelarea numerică pentru amestecarea electromagnetice într-un creuzet pătrat izoterm

Modelările numerice pentru amestecarea electromagnetice a topiturii de GaInSn în interiorul unui creuzet rectangular arată că structura de curgere depinde de valorile curenților electrici  $I$  care trec prin electrozi și câmpul magnetic aplicat  $B$ . Pentru o poziționare simetrică a electrozilor de-a lungul diagonalei suprafeței libere de topire, s-au observat două structuri principale, care par să domine curgerea fluidului. Aceste tipuri de structuri pot fi mai bine observate pentru valori extreme ale curentului electric la diferite câmpuri magnetice aplicate, după cum se poate vedea în Figura 8. Liniile de curgere au fost ilustrate folosind programul Paraview, prin grafice reprezentând traiectoriile particulelor din două surse de curgere plasate în partea de sus (albastru) și partea de jos (roșu) a structurii de vortex. Componenta radială a curentului electric combinată cu câmpul magnetic vertical generează o distribuție de forță Lorentz care generează o mișcare rotațională a topiturii. Datorită unei curgeri meridionale convergente, generată de gradientul de presiune radială, mișcarea rotațională este concentrată spre centru într-o structură de tip vortex ascendent. Acest tip de structură este foarte bine cunoscută în literatura de specialitate [V. Bojarevics et al., *Electrically Induced Vortical Flows*, Kluwer Academic Publishers, 1989, pp. 6, 174-195]

Curgerea generată de un electrod se intersectează cu cea de-a doua curgere (în direcție radială) generată de celălalt electrod. Curgerea rezultată este canalizată de-a lungul diagonalei dintre electrozi și se îndreaptă în jos în colțul superior și apoi din nou în colțul inferior, după cum se poate observa și în Figura 8. Am numit acest tip de curgere recirculație poloidală.

Pentru valori mici ale  $I$ , până la 2A, în funcție de câmpul magnetic, vortexul rotitor care apare sub fiecare electrod este mai puternic decât recirculația poloidală și se extinde în jos până în partea inferioară a creuzetului (Figura 8 (a), (c)). În acest caz vortexurile conectează toată structura în direcția poloidală.

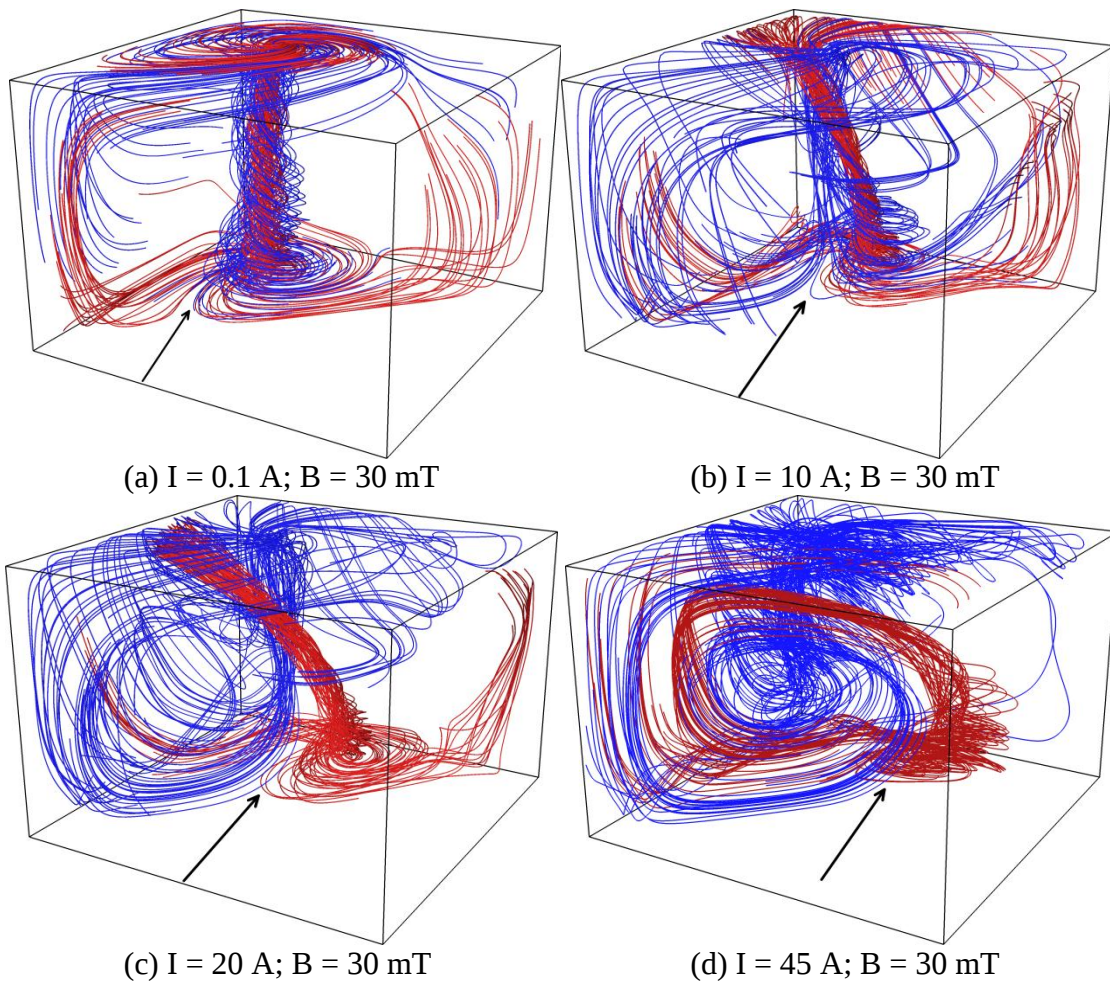
Pentru valori ridicate ale  $I$ , de la 2 A la 25 A, în funcție de câmpul magnetic, structura de curgere se schimbă. Recirculația poloidală devine mai puternică și împarte vortexul de sub fiecare electrod în două vortexuri localizate în partea superioară, respectiv în partea inferioară a creuzetului (Figura 8 (b), (d)). Recirculația poloidală conectează cele două vortexuri formate în jurul electrozilor (albastru), și colectează curgerea ce își are originea în vortexurile din partea inferioară (roșu).



**Figura 8.** Traectoriile particulelor pentru diferite valori ale curentului electric  $I$  și ale câmpului magnetic  $B$

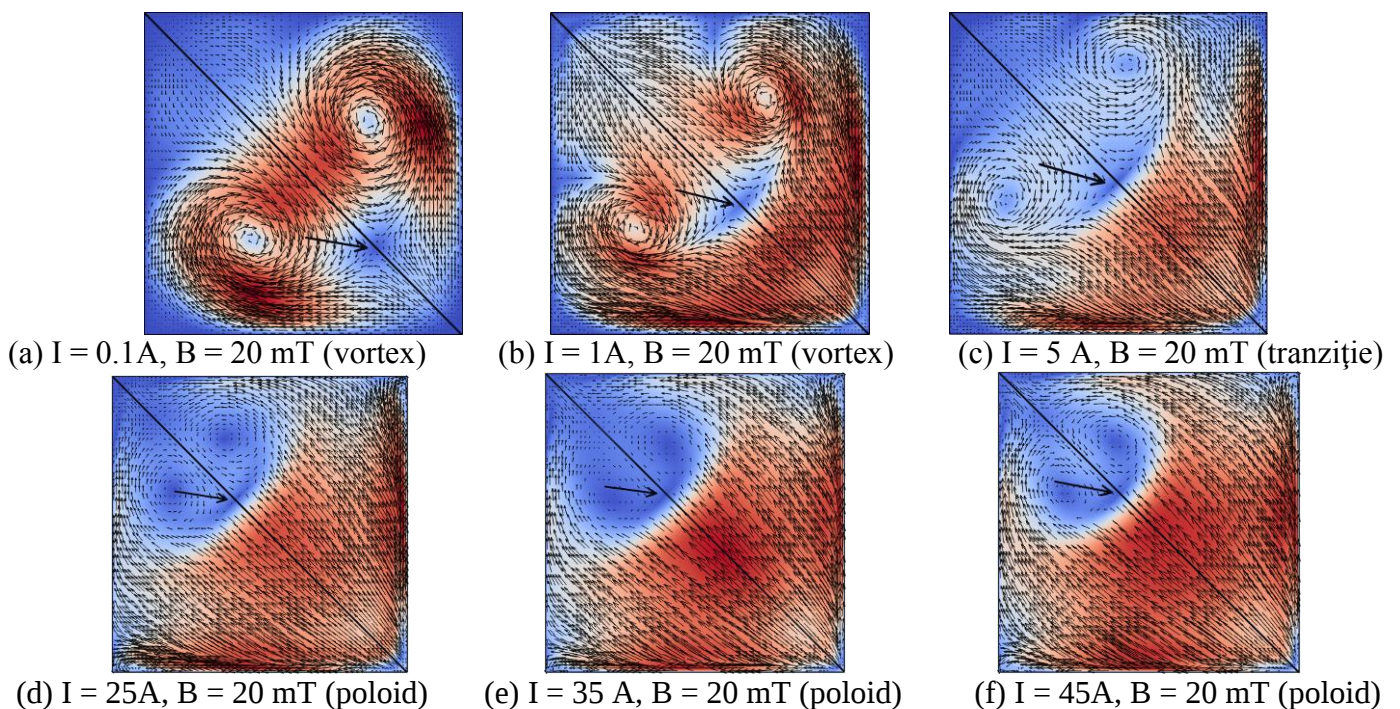
Pentru simplitate, ne vom referi la prima structură descrisă aici ca structură „Vortex”, datorită dominației în curgere a componentei vortex și la ce-a de-a doua precum „Poloidală”, datorită dominației componentei poloidale a curgerii.

Pentru o descriere mai detaliată a fenomenelor care generează diferitele structuri, datorită simetriei curgerii, vom examina curgerea în jurul unui singur electrod, care este ilustrată în Figura 9 pentru o anumită valoare a inducției câmpului magnetic ( $B=30 \text{ mT}$ ). Datorită unghiului de vizualizare, interacția dintre structura vortex și recirculația poloidală este accentuată. În Figura 9 (a), putem observa cazul dominației structurii vortex. Aproape de partea inferioară a creuzetului, curgerea poloidală interacționează cu cea dominată de vortexul opus în poziția marcată de săgeata neagră. În cazul din Figura 9(a), o structură clară de tip vortex poate fi observată sub electrod și curgerea poloidală este absorbită în vortex pe o direcție ascendentă. Odată cu creșterea intensității curentului electric, intensitatea curgerii poloidale crește de asemenea și structura vortex este deformată gradual (Figura 9 (b) și (c)). În aceste cazuri de tranziție spre o curgere dominant poloidală, vortexul absoarbe doar o parte din recirculația poloidală. Pentru valori suficient de mari ale curentului electric (de ex.  $I = 45 \text{ A}$ ), o structură „Poloidală” este obținută (Figura 9 (d)). În acest caz structura de vortex este împărțită în două vortexuri, unul aproape de suprafață și altul aproape de partea inferioară a creuzetului. Curgerea poloidală absoarbe acum ambele vortexuri și le conectează printr-o recirculație complexă.



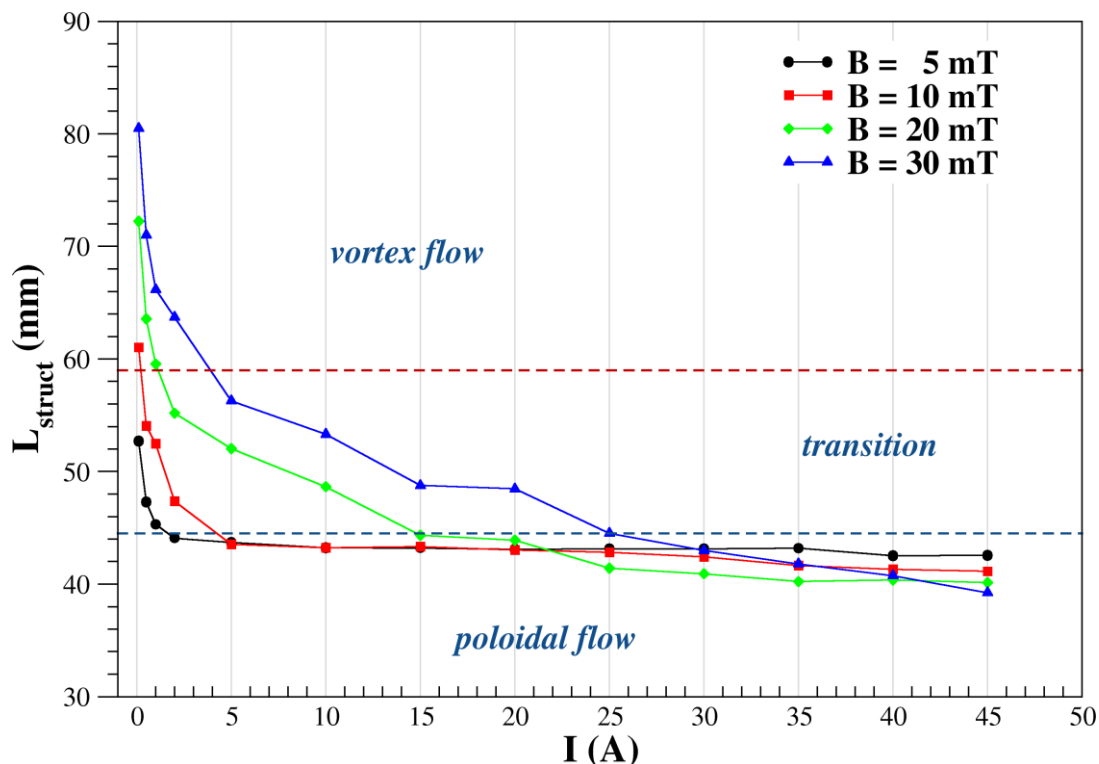
**Figura 9.** Traectoriile particulelor pentru diferite valori ale curentului electric  $I$  și ale câmpului magnetic  $B$

Pentru a caracteriza interacția dintre curgerea de tip „Vortex” și curgerea „Poloidală”, vom considera distanța de-a lungul diagonalei unde cele două curgeri opuse sunt echilibrate în partea inferioară, marcată de o săgeată neagră în Figura 9. În plan orizontal, la 5 mm înălțime față de partea inferioară (Figura 10), putem vedea clar poziția pe diagonală unde această echilibrare între structurile de curgere este atinsă. Putem astfel defini un parametru  $L_{struct}$  ca fiind o lungime caracteristică ce corespunde structurii de curgere.



**Figura 10.** Structura curgerii simulată pentru diferite valori ale curentului electric  $I$  (0.1 A – 45 A) și câmpului magnetic  $B = 20$  mT la 5 mm de la baza creuzetului. Săgeata indică locul unde se echilibrează curgerea de tip vortex cu cea de tip poloid. Culoarele reprezintă magnitudinea vitezei (roșu - viteză mare; albastru - viteză mică)

În Figura 11,  $L_{struct}$  a fost trasat pentru curenții electrici și câmpurile magnetice folosite în simulări. Fiecare rezultat din simulări a fost analizat în concordanță cu criteriul pentru identificarea tipului structurii de curgere („Vortex”, „Poloidală” sau tranziție) prezentat anterior.



**Figura 11.**  $L_{struct}$  ca lungime caracteristică ce definește tranziția dintre structura de tip vortex și cea de tip poloid pentru diferite valori ale curentului electric  $I$  și câmpului magnetic  $B$

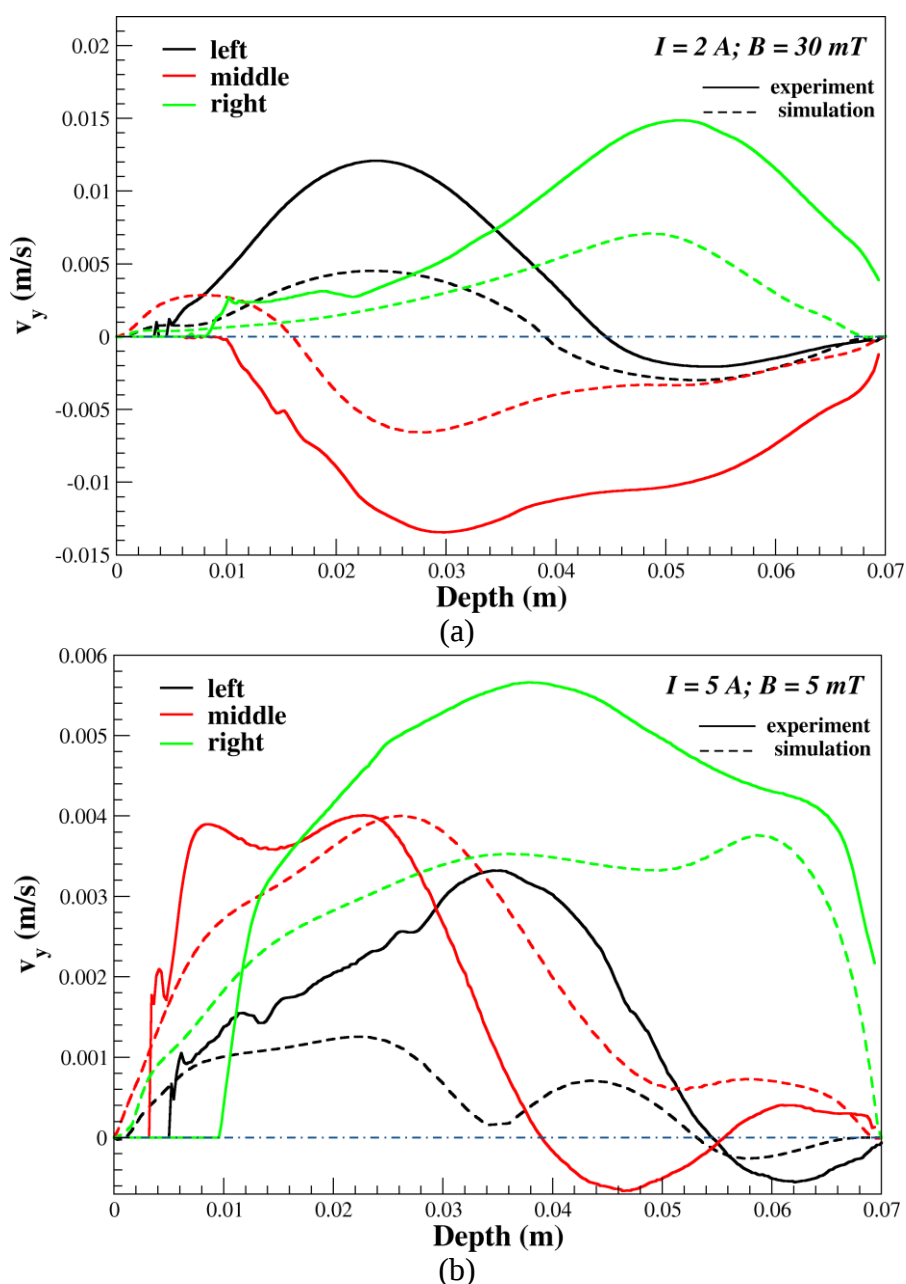
Din Figura 10 se poate observa că, aproape de partea inferioară a creuzetului, unde poziția interfeței de cristalizare ar trebui să fie în cazul solidificării direcționale, distribuția vitezelor înalte de curgere (roșu) este mai largă și mai uniformă pentru cazurile „Poloidale” decât cele „Vortex”. De asemenea, zonele unde topitura este foarte puțin amestecată (zonele „moarte”, cu viteze foarte mici, reprezentate cu albastru închis) sunt distribuite pe o zonă îngustă și concentrate spre un colț, care scad în mărime odată cu creșterea intensității curentului  $I$  pentru un anumit  $B$ . Se poate concluziona că structurile de curgere „Poloidale” ale amestecării topiturii în câmp electromagnetic vor duce la o rată de formare de precipitați mult mai scăzută decât în cazul structurilor de tip „Vortex”.

### Validarea metodei numerice printr-un model experimental

Pentru a valida existența structurilor de curgere prezise de modelările numerice, profilele experimentale de velocimetrie Doppler cu ultrasunete au fost obținute cât mai aproape de planul unde tranziția de la structură „Vortex” la cea „Poloidală” a fost cuantificată. Centrele piezoelementelor traductorilor ultrasonici au fost poziționate cât mai aproape de baza creuzetului, la  $z = 6$  mm de la baza creuzetului, datorită diferenței relative dintre baza creuzetului și înălțimea suportilor traductorilor. Coordonata  $x$  a lor, din partea stângă a creuzetului au fost: stânga – 8.5 mm; mijloc – 35.5 mm; dreapta – 62.5 mm. Profilele experimentale au fost comparate pe același grafic cu profilele de viteză obținute de-a lungul direcției  $Oy$  din modelările numerice pentru aceleași poziții  $x$  și  $z$  ca și pozițiile pe axă ale traductorilor.

Figura 12 (a) arată o comparație între rezultatele numerice și cele experimentale pentru o structură de tip „Vortex”, obținute la 2 A și 30 mT, pe când Figura 12 (b) arată o comparare între modelul numeric și experiment pentru o structură de tip „Poloidală”, obținută la 5 A și 5 mT. Cazul „Vortex” arată ca forma profilelor de viteză este aceeași în modelul numeric și în experiment, fapt care denotă aceeași structură de curgere. Pentru cazul „Poloidală”, forma profilelor de viteză este puțin diferită în experiment față de simulare, cu o diferență mai mare pentru traductorul din partea stângă, ceea ce denotă o structură de curgere comparabilă. Este de așteptat ca în cazul „Poloidală” să existe o diferență mai mare datorită curgerii tridimensionale complexe. În ambele cazuri valorile vitezelor sunt mai mari în experiment decât în simulări.

Deosebirile pot apărea din incertitudinile experimentale precum viteze diferite de 0 la pereții creuzetului, zona de contact a electrozilor cu topitura, divergența razei ultrasonice, imprecizia în determinarea valorilor parametrilor electromagnetici (datorate oscilațiilor intensității curentului sau mici neomogenități ale câmpului magnetic) sau acuratețea constantelor de material folosite în modelul numeric.



**Figura 12.** Profilele experimentale si numerice de viteză mediată în timp pentru fiecare din cei trei traductori (numite *left*-stânga, *middle*-mijloc, *right*-dreapta) la: (a)  $I = 2 \text{ A}$  și  $B = 30 \text{ mT}$ ; (b)  $I = 5 \text{ A}$  și  $B = 5 \text{ mT}$

## Obiectivul 2. Studiul experimental al curgerii topiturii sub influența unui tip special de câmp electromagnetic

### Proiectarea și construcția bobinei pentru generarea câmpului magnetic

**Tema tehnică.** Generarea unui câmp magnetic unidirecțional și uniform în interiorul unui volum de aer de dimensiune  $70 \times 70 \times 70$  cm. Se cere ca inducția câmpului magnetic  $B$  să fie reglată cu mijloace externe în intervalul  $0 \dots 0.35$  T.

**Prezentarea generală a soluției.** Soluția tehnică propusă constă în realizarea unui electromagnet alimentat în curent continuu în forma literei “C”, cu miez feromagnetic (fig. 13). Volumul de referință precizat în tema tehnică joacă rol de întrefier. Deoarece câmpul magnetic solicitat nu este alternativ sau rotitor, nu vor exista pierderi prin curenți Foucault și ca urmare miezul feromagnetic poate fi realizat din oțel masiv. Circuitul magnetic creat (miez + întrefier) va fi excitat de o înfășurare electrică de curent continuu, dimensionată astfel încât inducția magnetică în volumul de referință să poată atinge valoarea  $B = 0.35$  T.

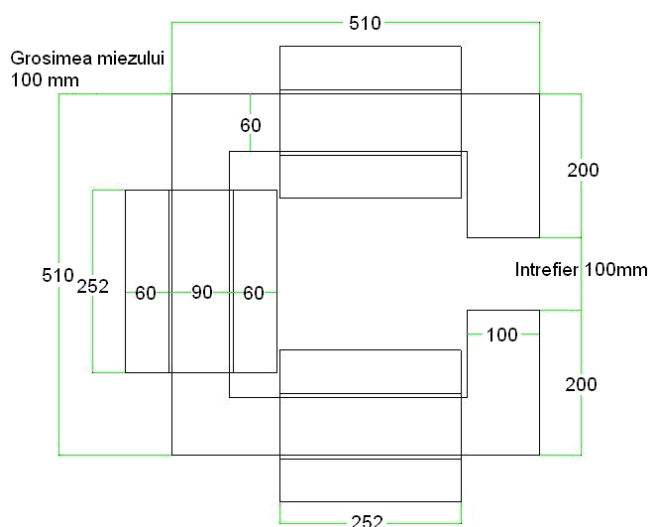
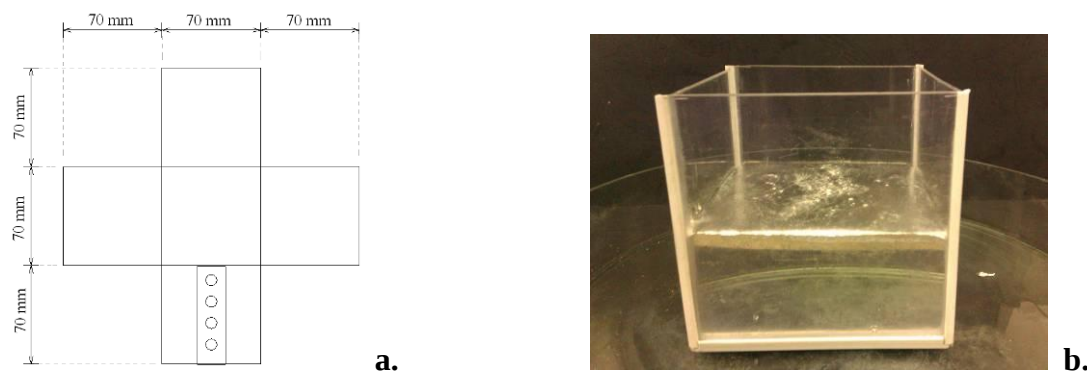


Fig. 13. Schita reprezentând o secțiune transversală a electromagnetului

Având în vedere deformarea liniilor de câmp în zona întrefierului volumul acestuia a fost prevăzut mai mare, egal cu  $100 \times 100 \times 100$  mm. Pentru a beneficia de un câmp magnetic cât mai uniform, experimentele vor fi derulate în interiorul unui volum de  $70 \times 70 \times 70$  mm din centrul întrefierului.

**CREUZETUL.** Este realizat din plexiglas. Are forma unui cub cu latura de 70 mm astfel încât să ocupe volumul cu câmp magnetic constant din întrefierul electromagnetului. Forma cubică emulează forma creuzetelor industriale de obținere a siliciului multicristalin prin solidificare direcțională. Pe unul dintre pereții laterali sunt fixate traductoarele velocimetrului. Contactul între traductoare și perete este realizat cu gel ultrasonic. În figura 14 sunt prezentate o schiță de execuție a creuzetului și o fotografie a acestuia umplut cu substanța de lucru (GaInSn).



**Figura 14.** (a) Schiță desfășurată a creuzetului; (b) Fotografie a creuzetului umplut cu aliajul eutectic  $\text{Ga}_{0.685}\text{In}_{0.215}\text{Sn}_{0.1}$ .

**SUBSTANȚA.** Au fost achiziționate două kilograme ( $310 \text{ cm}^3$ ) de aliaj semiconductor  $\text{Ga}_{0.685}\text{In}_{0.215}\text{Sn}_{0.1}$ . Acesta este un aliaj eutectic cu temperatura de solidificare,  $T_s = 10.5^\circ\text{C}$ . Proprietățile fizice apropiate de cele ale siliciului topit permit realizarea experimentelor la temperatură ambiantă. Fotografia 14b prezintă creuzetul umplut cu substanță.



**Figura 15.** (a) Schiță a capacului electrozi; (b) Fotografie a capacului în care se văd doi electrozi

**ELECTROZII.** Pentru asigurarea unui câmp electric în substanță creuzetul este prevăzut cu un capac, proiectat astfel încât să permită introducerea în aliaj a doi sau mai mulți electrozi în diferite configurații. Întrucât  $\text{Ga}_{0.685}\text{In}_{0.215}\text{Sn}_{0.1}$  este o substanță corozivă electrozii au fost realizați din oțel inoxidabil. În figura 15 sunt prezentate schița capacului și o fotografie a acestuia.

**ALIMENTARE.** Alimentarea electrozilor este realizată de la o sursă de tensiune continuă LAB- EC3010, reglabilă în domeniul 0-30V și care admite un curent maxim de 10A.

Velocimetrul cu ultrasunete Doppler DOP3010 (Fig. 16) a fost achiziționat pentru măsurarea vitezelor de curgere a unor lichide conductoare, cum este topitura semiconductoră opacă de  $\text{GaInSn}$ , folosită în experimentul nostru. În ultimele decenii tehnica velocimetriei Doppler cu ultrasunete (denumită în continuare UDV) a devenit o metodă acceptată pentru investigarea curgerilor în diferite topituri metalice opace. Metoda UDV este bazată pe tehnica puls-ecou și permite vizualizarea profilelor de viteză instantanee de-a lungul direcției de propagare a undei ultrasonice. Ea utilizează ecografia cu ultrasunete pulsate pentru a măsura profilul de viteză în interiorul lichidelor aflate în curgere.



Figura 16. Volumele de măsură a proiecției vitezei de-a lungul pulsului de ultrasunete emis de către transducer

Velocimetrul calculează și afișează în timp real profilul de date bazat pe analiza unui număr specificat de utilizator de volume (discuri) de măsură plasate concentric de-a lungul undei ultrasonice emise și recepționate de către un transducer (Figura 16, jos).

Prin folosirea mai multor canale (transducere), velocimetrul oferă informații în spațiu asupra câmpului de viteze. Timpul de măsură este de câteva milisecunde, secvențial pentru mai multe canale (transducere). Velocimetrul dispune de un soft propriu. Transferul datelor achiziționate se face printr-o interfață USB.

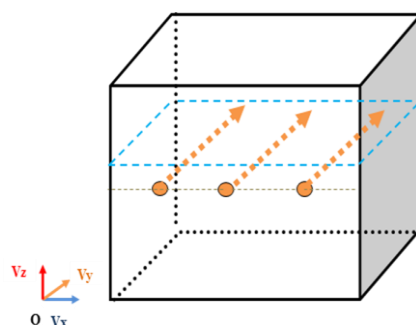
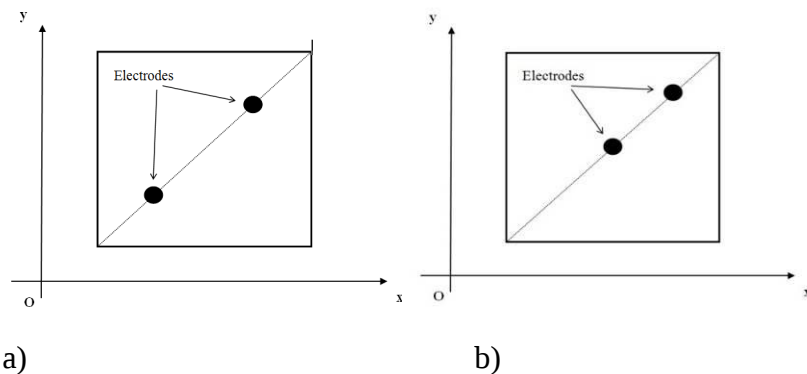


Figura 17. Schiță poziționare transducere pe creuzet

Senzorii UDV (transducerii) au fost poziționați perpendicular pe pereții exterior al creuzetului (ca în Figura 17) cu lichid conductor plasat în interiorului câmpului electromagnetic. Aceștia (marcați prin cercuri portocalii) au fost puși în trei poziții (stanga, mijloc, dreapta) de-a lungul unei linii orizontale pentru măsurarea vitezei. Transducerii, care sunt perpendiculari pe planul  $XOZ$ , măsoară componenta  $V_y$  a vitezei de curgere. Pătrățelele portocalii reprezintă volume (puncte) de măsură în care se determină valoarea lui  $V_y$ .

Cu ajutorul Velocimetrului cu ultrasunete DOP3010 achiziționat și comisionat în cadrul proiectului au fost realizate măsurători de viteză de curgere în interiorul configurației experimentale. Astfel într-un creuzet de plexiglas ce emulează forma creuzetelor industriale de obținere a siliciului multicristalin prin solidificare direcțională a fost turnată o topitura de GaInSn lichidă la temperatura camerei. Topitura este pusă în contact cu un curent electric prin intermediul a doi electrozi plasați într-un capac al creuzetului. Au fost alese două configurații ale electrozilor: una simetrică, cu electrozii plasați la o treime, respectiv două treimi pe lungimea diagonalei și alta asimetrică, cu un electrod plasat în centrul creuzetului și altul la o treime de marginea exterioară. Acestea sunt ilustrate în *Figura 18*



*Figura 18. a) configurația simetrică b) configurația asimetrică a electrozilor*

Creuzetul a fost plasat în înțefiereul electromagnetului , după cum se observă în *Figura 19*, unde i s-a aplicat un camp magnetic vertical de 10mT (pentru ambele configurații), respectiv de 3 mT (doar pentru configurația simetrică).

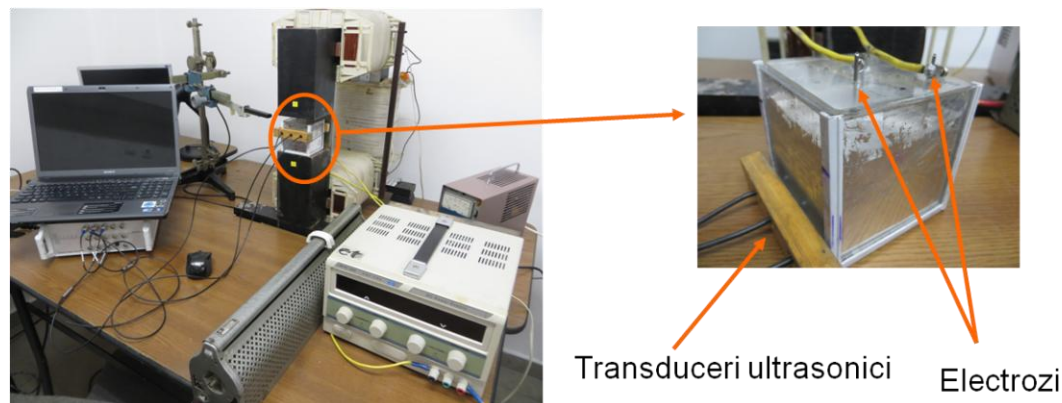


Figura 19. Configurație experimentală cu electromagnet, velocimetru cu transducere ultrasonice, creuzet cu topitură de GaInSn pus în contact electric de electrozi alimentați de la sursă de curent continuu

Perpendicular pe creuzet a fost aplicat un montaj cu senzori (transducere) ultrasonice la trei nivele (5 mm, 25 mm și 40 mm) măsurându-se concomitent profilele de viteză în adâncime (proiecția vitezei pe axa ce trece prin centrul fiecărui transducer) pentru trei poziții (9 mm, 35mm și 61 mm). Aceste măsurători au fost efectuate la valorile de câmp magnetic alese pentru cele două configurații de electrozi și la valori ale curentului de 2 A, 5 A și respectiv de 10 A.

### Configurația asimetrică

Pentru toate măsurătorile, independent de forma profilului corespunzător unei structuri de curgere, se observă că, pe măsură ce valoarea intensității curentului electric este crescută, curgerea (profilul) rămâne similară, cu valori crescătoare ale vitezei.

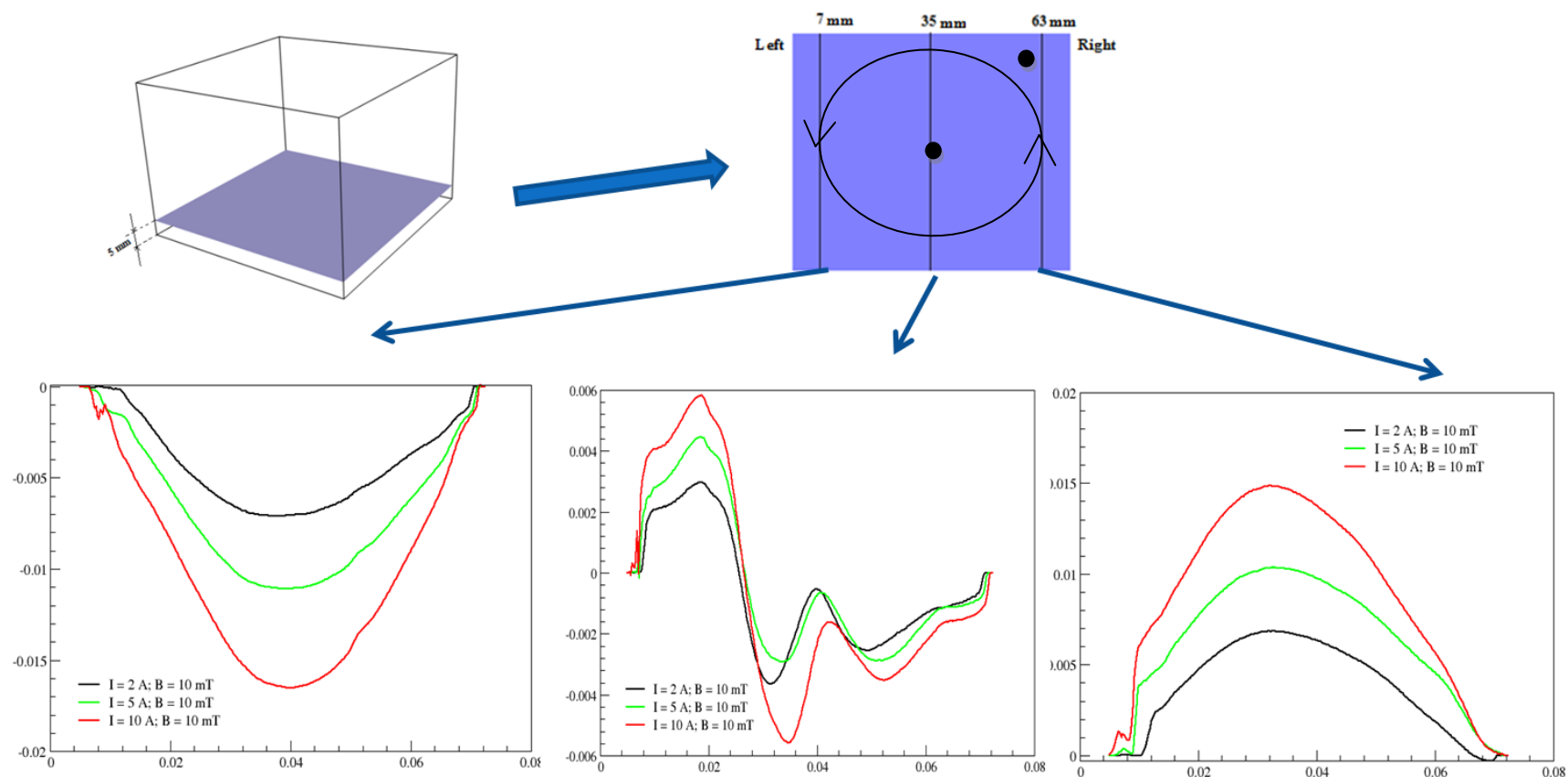


Figura 20. Componenta vitezei de curgere de-a lungul axei celor 3 transducere plasate la 9 mm, 35 mm și 61 mm față de peretele din stânga al creuzetului, în planul aflat la înălțimea 5 mm față de bază pentru  $I = 2$  A, 5 A și 10 A la  $B = 10$  mT, în cazul unei configurații asimetrice a electrozilor

În Figura 20 se observă profilele de viteză de-a lungul axei celor 3 transducere, în planul aflat la înălțimea de 5 mm. Structura de curgere pare complet dominată de electrodul din mijloc, profilele de la 9 mm, respectiv 61 mm indicând o valoare negativă cu un maxim la mijloc, respectiv una pozitivă cu un maxim poziționat la fel, corespunzătoare unei mișcări de rotație în jurul centrului. Profilul de la 35 mm arată o trecere de la curgerea înspre senzor în prima jumătate și dinspre el în a doua jumătate, maximum din centru putând fi explicat prin proeminența unei structuri centrale de vortex ce se prelungește în jos pe axa ce conține electrodul. De altfel, aici se și înregistrează cele mai mari valori ale vitezei dintre toate profilele asimetrice, fapt coerent cu contactul dintre structura de vortex și fundul creuzetului, ce ar determina o recirculare în plan orizontal a componentei curgerii ce cobora pe verticală prin vortex.

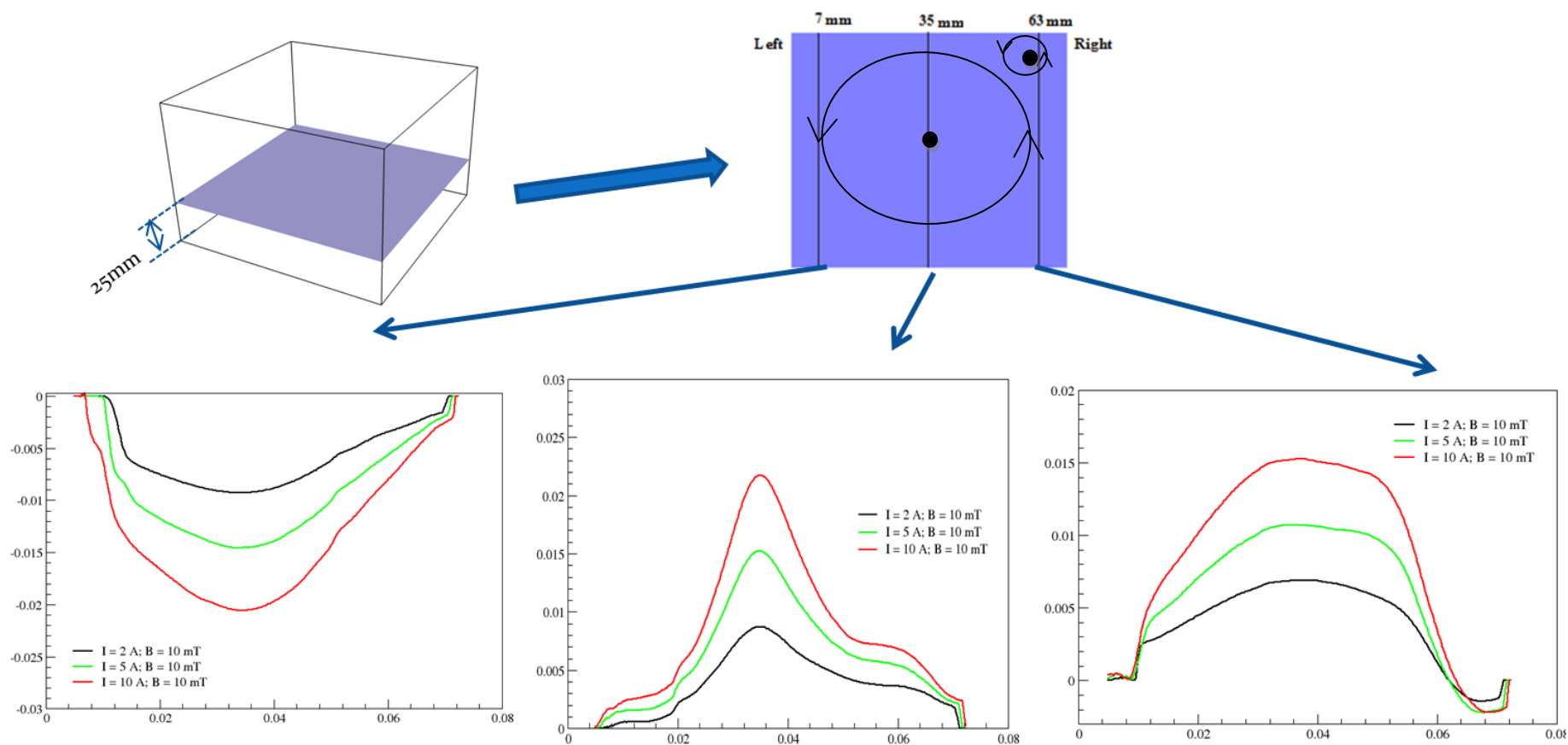


Figura 21. Componenta vitezei de curgere de-a lungul axei celor 3 transducere plasate la 9 mm, 35 mm și 61 mm față de peretele din stânga al creuzetului, în planul aflat la înălțimea 25 mm față de bază pentru  $I = 2$  A, 5 A și 10 A la  $B = 10$  mT, în cazul unei configurații asimetrice a electrozilor

În Figura 21, unde sunt reprezentate profilele de curgere corespunzătoare planului de la 25 mm față de bază, se observă aceeași tendință de dominanță a electrodului central asupra structurii de curgere. Profilul din mijloc nu surprinde o schimbare a direcției de curgere, ci doar un maxim al vitezei de rotație în centru, ceea ce indică o deplasare laterală a centrului rotației. Acesastă asimetrie este confirmată și de o deplasare a minimumului profilului vitezei de la 9 mm dinspre zona de mijloc înspre origine. La o examinare atentă a profilului din dreapta (61 mm) se observă pe final și efectul electrodului plasat asimetric, care determină o rotație în sens opus, explicându-se astfel valorile negative de la capătul profilului.

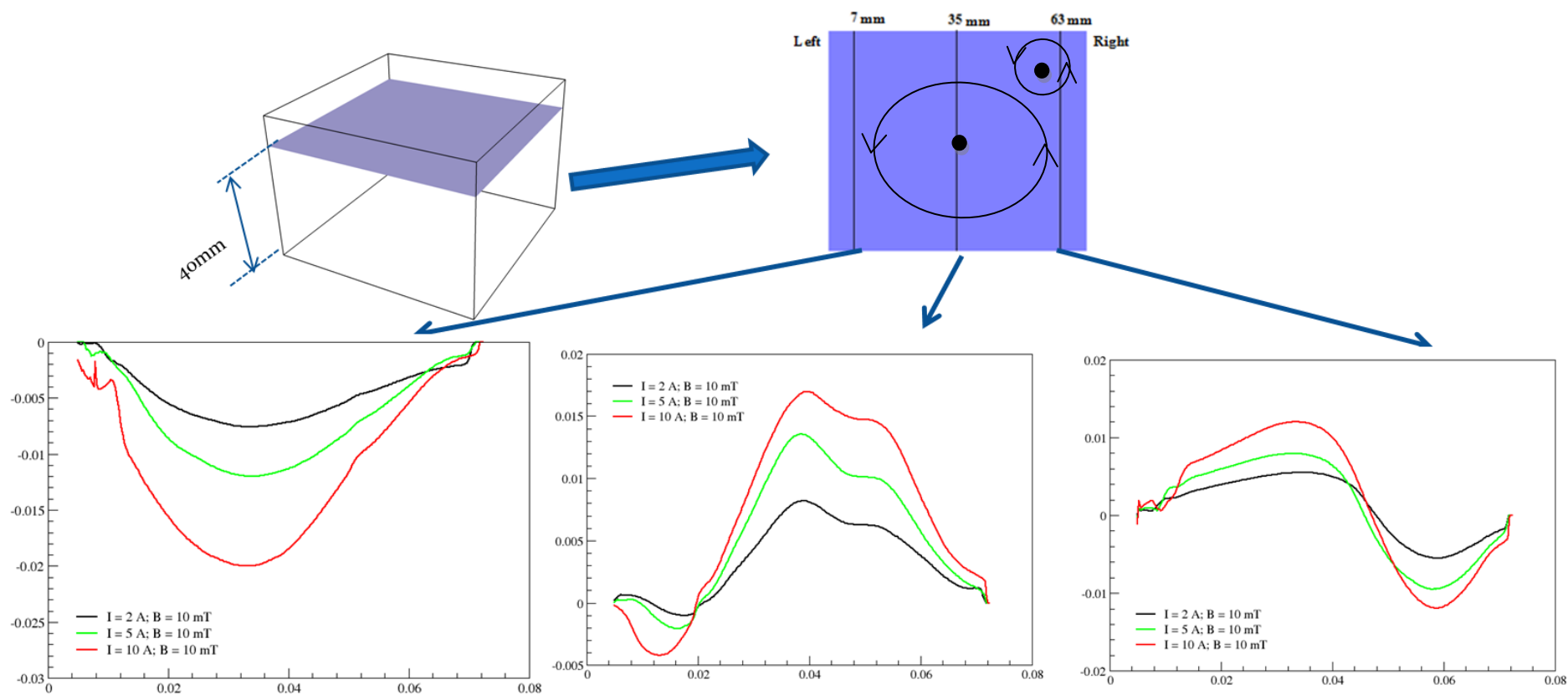


Figura 22. Componenta vitezei de curgere de-a lungul axei celor 3 transducere plasate la 9 mm, 35 mm și 61 mm față de peretele din stânga al creuzetului, în planul aflat la înălțimea 40 mm față de bază pentru  $I = 2$  A, 5 A și 10 A la  $B = 10$  mT, în cazul unei configurații asimetrice a electrozilor

În Figura 22 se observă profilele de viteză corespunzătoare structurii de curgere din planul situat la 40 mm înălțime față de baza creuzetului. Situația pare similară cu cea din Figura IV, indicând o deplasare a vortexului central spre stânga și o proeminență mai mare a structurii de curgere determinată de electrodul plasat lateral (schimbarea direcției de curgere la finalul profilului de la 61 mm). În cazul profilului de la 35 mm se observă valori maxime mai mici (0.015 m/s față de 0.02 m/s la 25 mm) dar o distribuție a acestora pe o lungime mai mare, aspect corespunzător probabil cu antrenarea unei porțiuni mai mari din topitura de la suprafață înspre baza, asemenea unui lichid ce se scurge spre gura unei pâlnii (vortex vertical).

### Configurația simetrică

Pentru toate măsurătorile, la 10 mT, independent de forma profilului corespunzător unei structuri de curgere, se observă că, pe măsură ce valoarea intensității curentului electric este crescută, curgerea (profilul) rămâne similară, cu valori crescătoare ale vitezei. Acest lucru nu este însă valabil dacă se aplică un câmp

magnetic mai mic (3mT și un curent de 10 A). Schimbarea intensității curentului electric influențează valoarea termenului sursă a curgerii (forța Lorentz care este produsul densității de curent cu câmpul magnetic), pe când modificarea valorii câmpului magnetic are și un alt efect pe lângă modificarea forței Lorentz, probabil legat de o amortizare a recirculației topiturii în plan vertical (direcția câmpului magnetic), diferită pentru diferite valori ale câmpului magnetic.

Pentru a înțelege structura de curgere în cazul poziționării simetrice a celor doi electrozi, care este mai complexă, față de cazul asimetric, este necesară o primă analiză mai aproape de suprafață. În *Figura 23* sunt reprezentate profilele de viteză pentru curgerea în planul de la 40 de mm față de bază. Profilul de la 9 mm indică o curgere mai puternică în sensul dinspre senzor (pozitiv), aproape de electrod și una mai slabă, în sens opus, mai departe de origine. Profilul de la 61 mm indică o curgere mai slabă înspre senzor (valori negative ale vitezei) aproape de origine și una puternică, în jurul poziției electrodului, de sens opus (valori pozitive ale vitezei) mai departe. Acest fapt poate fi explicat prin existența a două bucle de convecție a topiturii în jurul electrozilor, ce se învârt în sens opus, fapt confirmat și de observațiile vizuale de la suprafața topiturii. Privind profilul de la 35 mm, avem o confirmare a curgerii înspre senzor provenind de la ambii electrozi, dar și o indicație că maximum vitezei de curgere este deplasat în afara liniei mediane, spre diagonala secundară (cea care nu conține electrozii). Observații vizuale pe o configurație similară cu o soluție apoasă de NaOH au indicat posibilitatea unei curgeri înspre colțul de jos al diagonalei mici a creuzetului (din *Figura 23*) care atinge pereții și apoi este recirculată în jos, în planul vertical.

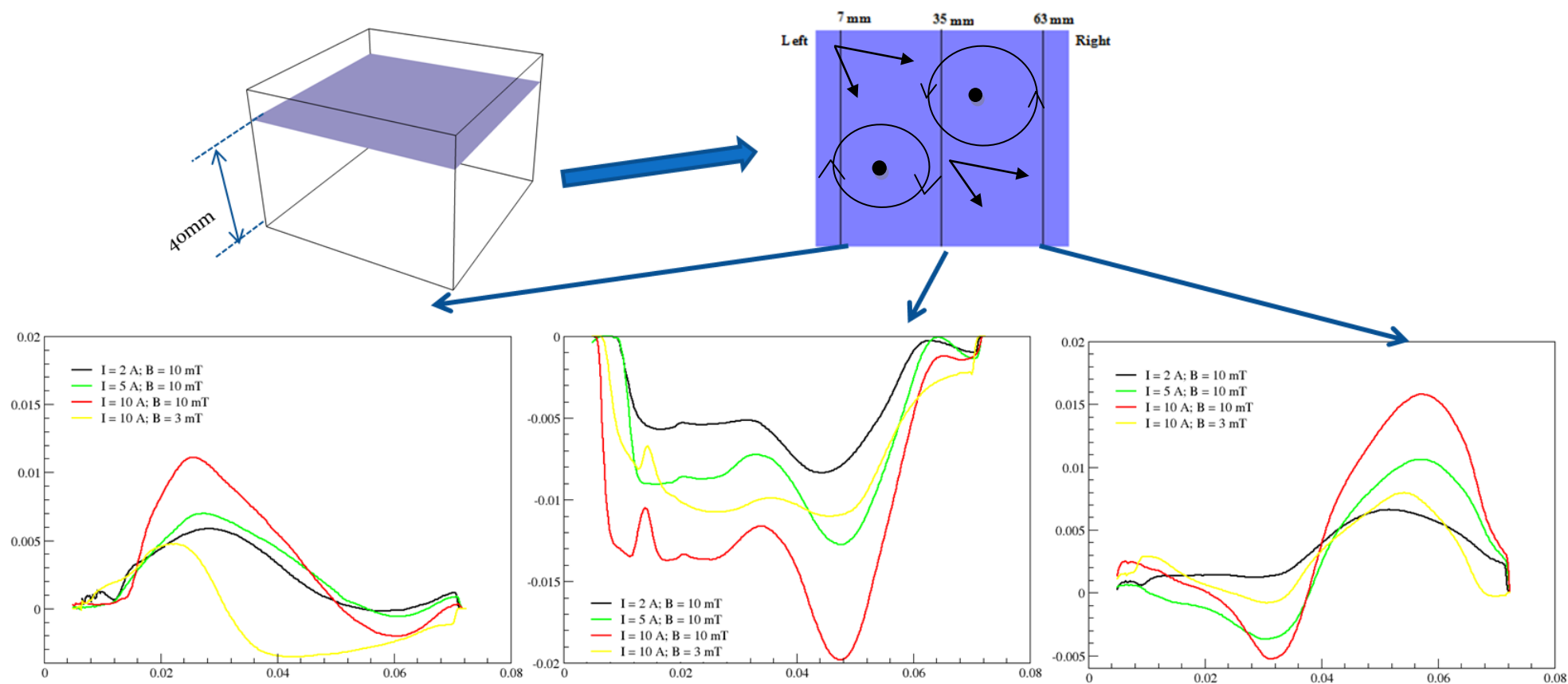


Figura 23. Componenta vitezei de curgere de-a lungul axei celor 3 transducere plasate la 9 mm, 35 mm și 61 mm față de peretele din stânga al creuzetului, în planul aflat la înălțimea 40 mm față de bază pentru  $I = 2 \text{ A}$ ,  $5 \text{ A}$  și  $10 \text{ A}$  la  $B = 10 \text{ mT}$ , respectiv  $I = 10 \text{ A}$  și  $B = 3 \text{ mT}$ , pentru o configurație simetrică a electrozilor

În Figura 24 sunt reprezentate profilele de viteză pentru curgera în planul de la 25 de mm față de bază. În mare, se păstrează caracteristicile curgerii din planul de la 40 mm, doar că structura pare mai complexă, posibil turbulentă.

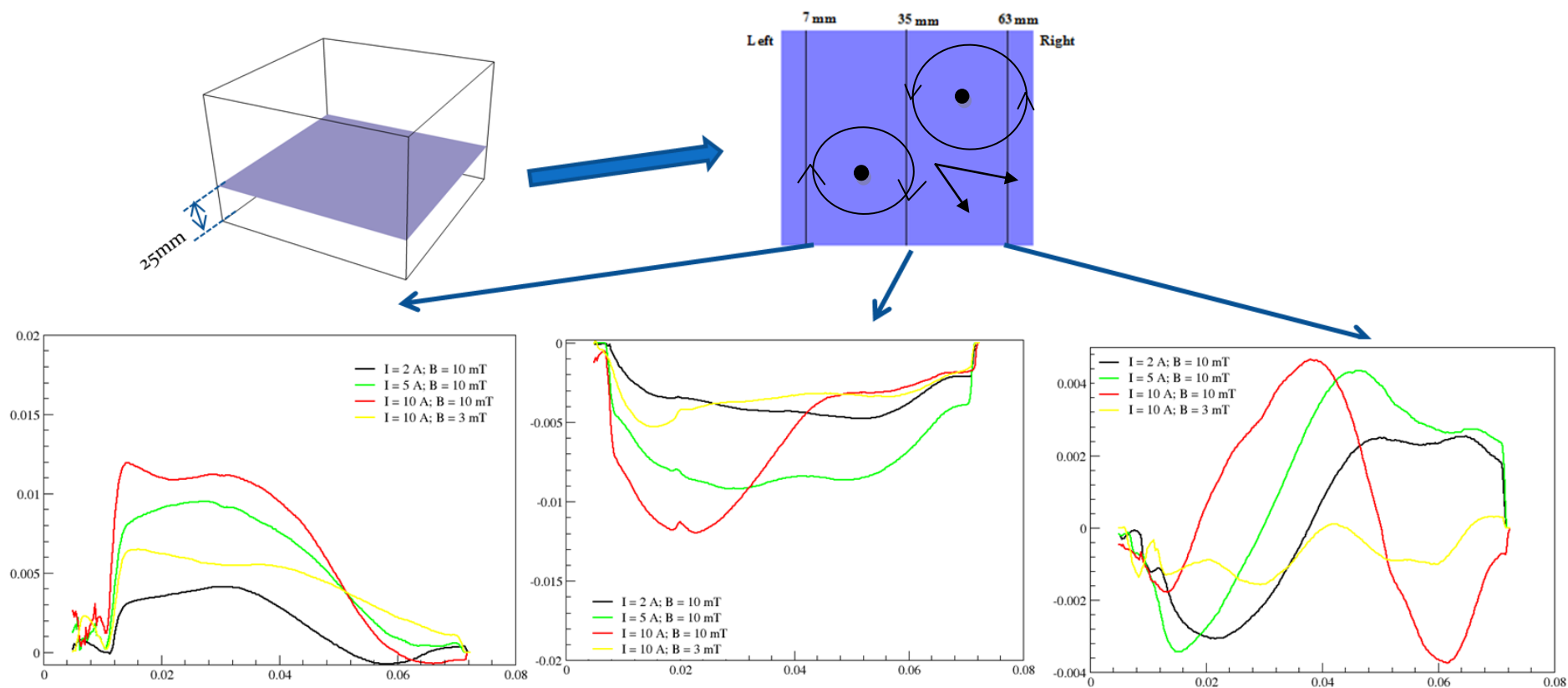


Figura 24. Componenta vitezei de curgere de-a lungul axei celor 3 transducere plasate la 9 mm, 35 mm și 61 mm față de peretele din stânga al creuzetului, în planul aflat la înălțimea 40 mm față de bază pentru  $I = 2 \text{ A}$ ,  $5 \text{ A}$  și  $10 \text{ A}$  la  $B = 10 \text{ mT}$ , respectiv  $I = 10 \text{ A}$  și  $B = 3 \text{ mT}$ , pentru o configurație simetrică a electrozilor

Din Figura 25 sunt reprezentate profilele de viteză pentru curgerea în planul de la 5 de mm față de bază. Toate profilele de curgere, indiferent de poziție indică valori mari pozitive ale vitezei în zona apropiată de senzorii ultrasonici. Acestea rămân pozitive de-a lungul profilului, ceea ce nu corespunde unei structuri de rotație, ci ca și cum ar proveni de la o sursă. Acesta (redată în schema de la Figura 25) poate proveni de la curgerea din planul vertical, care a fost observată în planurile de la 25 mm și 40 mm. Topitura, atunci când ajunge la baza creuzetului (dinspre diagonala secundară) este recirculată pe fundul acestuia, urcând în colțul opus (sau pereții opuși).

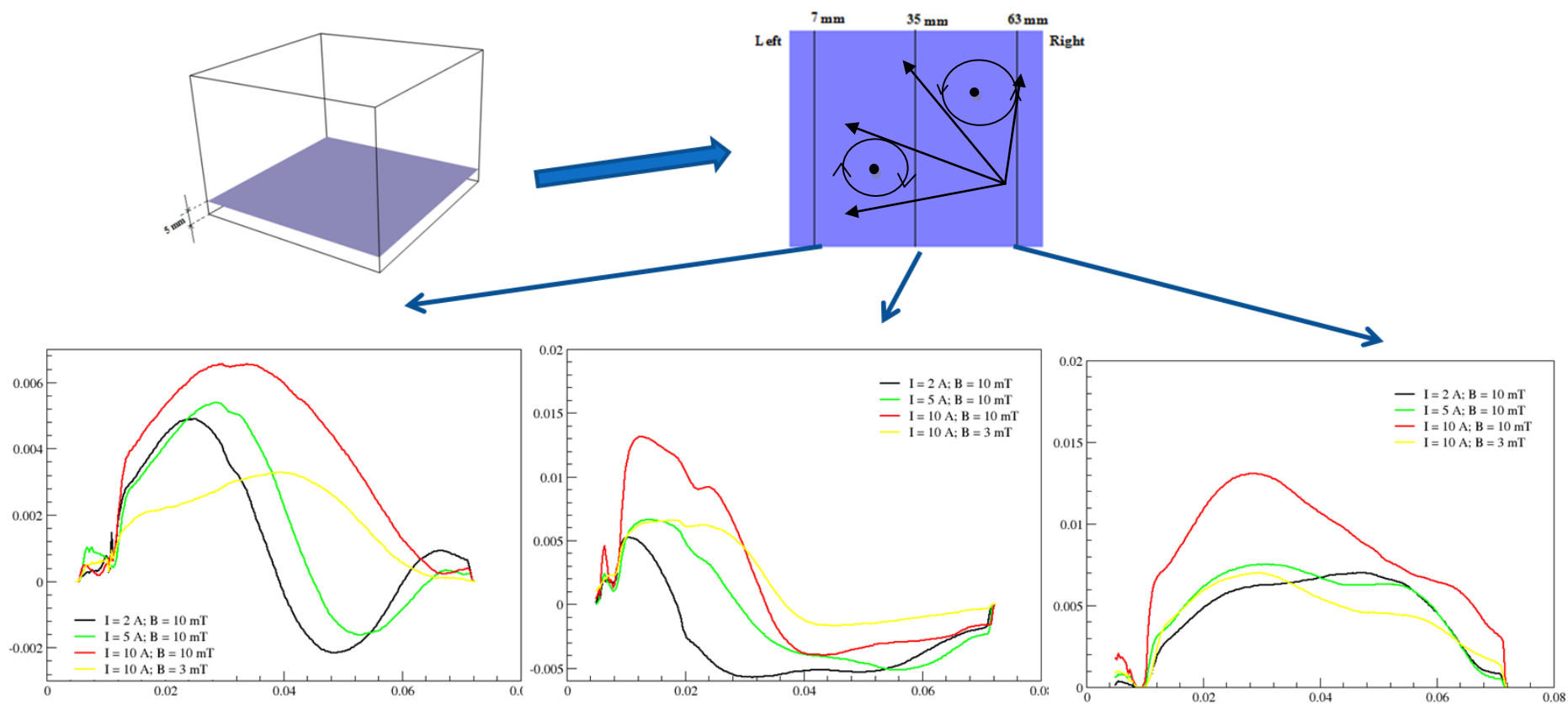


Figura 25. Componenta vitezei de curgere de-a lungul axei celor 3 transducere plasate la 9 mm, 35 mm și 61 mm față de peretele din stânga al creuzetului, în planul aflat la înălțimea 35 mm față de bază pentru  $I = 2 \text{ A}$ ,  $5 \text{ A}$  și  $10 \text{ A}$  la  $B = 10 \text{ mT}$ , respectiv  $I = 10 \text{ A}$  și  $B = 3 \text{ mT}$ , pentru o configurație simetrică a electrozilor

### Obiectivul 3. Modelarea curgerii topiturii si a distributiei impuritatilor sub influenta campului electromagnetic intr-o instalatie pentru cresterea siliciului multicristalin de marime industrială

Programul STHAMAS3D a fost dezvoltat de către Prof.dr. Daniel Vizman, directorul proiectului, la Institutul Fraunhofer IISB din Erlangen Germania. Scopul programului este de a rezolva ecuațiile care guvernează curgerea fluidului în procesele de creștere a cristalelor. În cadrul acestei activități a fost dezvoltat un model de transport al impuritatilor într-o topitura de Siliciu, a caror aglomerare poate duce la formarea de precipitații. STHAMAS3D este un software specializat cu ajutorul căruia se pot efectua simulări numerice tridimensionale dependente de timp pe o rețea numerică bloc - structurată neortogonală.

Procedura de discretizare a STHAMAS3D este bazată pe metoda volumului finit metodă cunoscută ca fiind frecvent utilizată în rezolvarea de probleme de curgere a fluidului. Metoda volumului finit pornește de la forma integrală a ecuațiilor de conservare a masei, impulsului și energiei. Domeniul de calcul este subîmpărțit într-un număr finit de volume de control, iar ecuațiile de conservare se aplică fiecărui element. În centrul fiecărui astfel volum de control se găsește un nod central în care se vor calcula valorile variabilelor. Valorile variabilelor la suprafața volumului sunt exprimate prin interpolare în funcție de valorile din nodul central. Pentru fiecare volum finit se va obține o ecuație algebrică prin calculul integralei de suprafață în urma aproximării cu diferențe finite a derivatelor ce intervin în aceasta.

Domeniul de calcul folosit pentru studiul configurației de interes pentru acest proiect constă din topitură și cristal de siliciu așa cum se vede în Figura 26. Creuzetul paralelipipedic de dimensiuni  $38 \times 38 \times 40 \text{ cm}^3$  corespunde standardului G2 pentru dimensiunea lingourilor de siliciu.

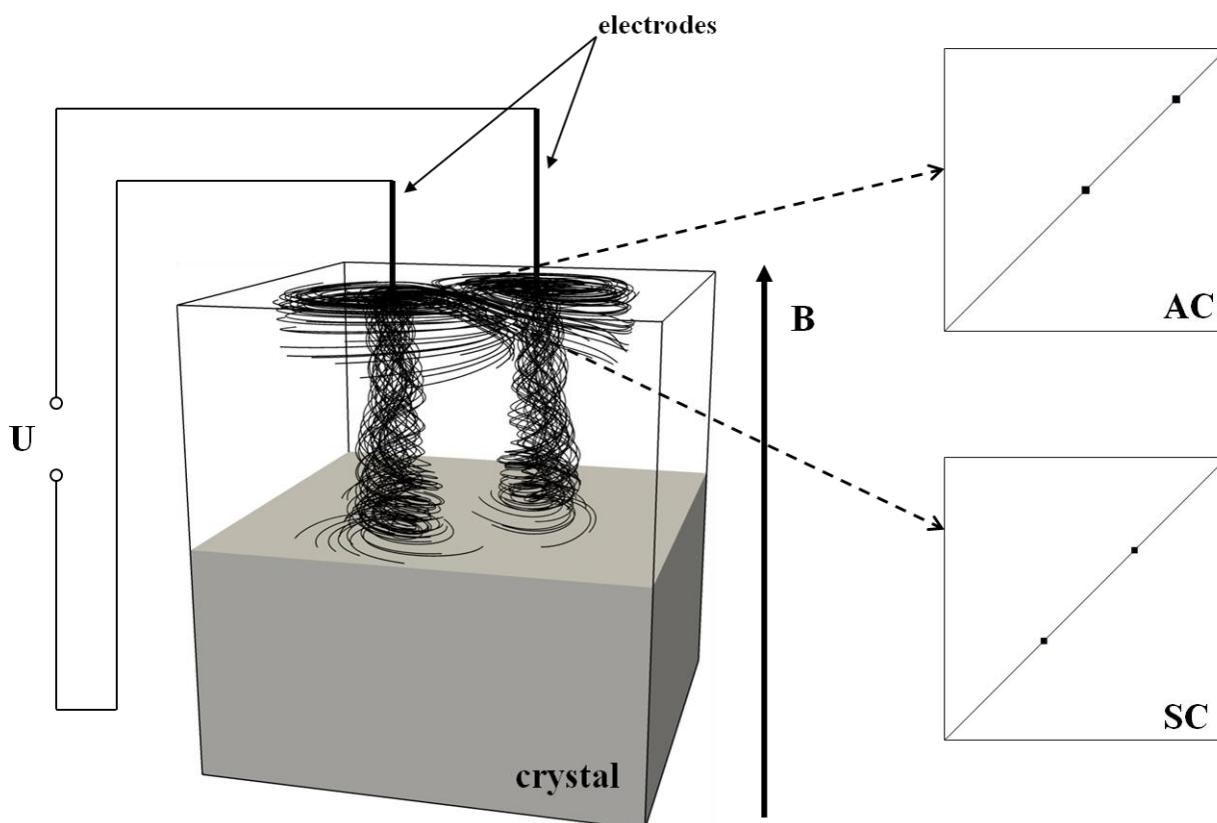


Figura 26. Reprezentarea schematică a domeniului de calcul și a poziționării electrozilor

La suprafața liberă, au fost poziționați doi electrozi prin care un curent electric este injectat în topitură. Două tipuri de configurații ale electrozilor au fost utilizate în simulări:

- o configurație asimetrică (AC): un electrod este poziționat în centrul suprafeței libere a topiturii și un al doilea electrod este poziționat la  $1/3$  din lungimea diagonalei față de colț;
- o configurație simetrică (SC): cei doi electrozi sunt poziționați, pe o diagonală, simetric față de punctul din centru, la  $1/3$  și  $2/3$  din lungimea diagonalei față de punctul din stânga jos.

Pentru a studia influența câmpului electromagnetic asupra transportului de impurități și asupra ratei de soluție a creuzetului pentru un proces de solidificare direcțională în siliciu, ecuațiile de transport trebuie rezolvate împreună cu ecuația potențialului scalar.

Calitatea simulărilor efectuate depinde în mare măsură și de alegerea rețelei de calcul. De aceea în STHAMAS3D s-a folosit o procedură de detectare a fazei astfel că la fiecare pas de timp rețeaua este deformată astfel încât interfața solid-lichid să corespundă întotdeauna temperaturii de solidificare. De asemenea, la pereți se realizează o îndesire a rețelei de calcul pentru a rezolva straturile limită așa cum se observă în Figura 27.

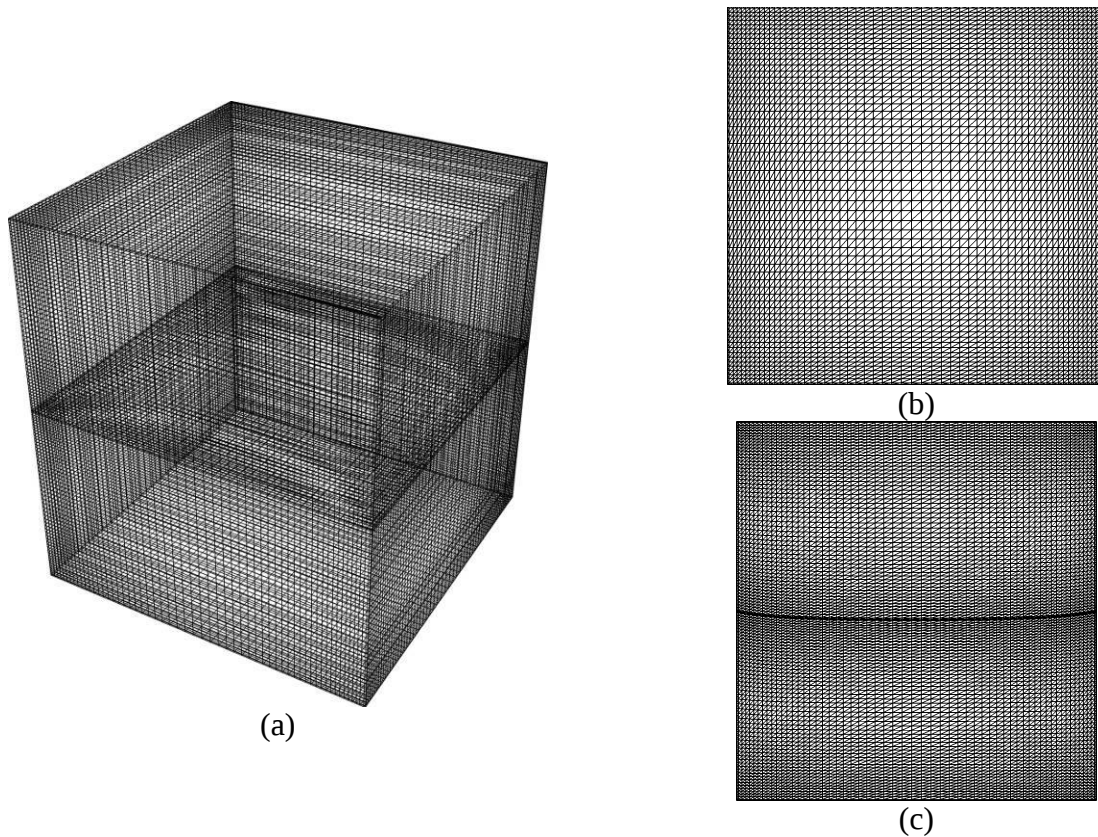


Figura 27. Rețeaua de calcul utilizată în modelările numerice; vedere de ansamblu (a), secțiune de orizontală (b) și secțiune verticală (c)

Pentru descrierea curgerilor turbulente în STHAMAS3D se folosește o combinație între schema cu diferențe înainte (UDS) și schema cu diferențe centrate (CDS) pentru interpolarea fluxurilor convective. Folosind doar schema cu diferențe finite centrate nu se pot descrie fluctuațiile turbulente de frecvență mare. În schimb, neutilizarea CDS duce la suprimarea instabilităților mecanice din cauza difuziei numerice. De aceea, pentru a obține rezultate care să fie semnificative din punct de vedere fizic, pentru calculul fluxurilor convective s-a folosit un flux combinat între schema cu diferențe finite centrate și schema cu diferențe finite înainte. Pentru corecțiile de presiune se aplică algoritmul SIMPLE, iar pentru rezolvarea integralelor de timp se utilizează metoda Euler implicită.

Pentru calculul distribuției de impurități, împreună cu ecuațiile Navier-Stokes[1-3] trebuie rezolvată și ecuația difuziei

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial y_j} \left( v_j c - D \frac{\partial c}{\partial y_j} \right)$$

unde  $\rho$  este densitatea fluidului,  $v_i$  este componenta  $i$  a vitezei de curgere a fluidului.  $\mu$  este vâscozitatea dinamică a unui fluid Newtonian,  $p$  este presiunea,  $C_p$  capacitatea calorică,  $k$  este conductivitatea termică,  $c$  reprezintă concentrația de impurități și  $D$  este coeficientul de difuzie.

De asemenea, densitatea de forță Lorentz este luată în considerare în ecuația de conservare a impulsului:

$$f_{L,i} = (\vec{j} \times \vec{B})_i$$

unde  $\vec{j}$  este densitatea de curent electric, iar  $\vec{B}$  este inducția câmpului magnetic.

Densitatea de curent electric poate fi determinată din legea lui Ohm:

$$\vec{j} = \sigma(-\vec{\nabla}\Phi + \vec{v} \times \vec{B})$$

în care, pentru câmpul electric, s-a utilizat aproximația MHD2 ( $\vec{E} = -\vec{\nabla}\Phi$ ), unde  $\Phi$  este potențialul scalar și  $\sigma$  conductivitatea electrică. Potențialul scalar se calculează cu ajutorul ecuației de continuitate pentru densitatea de curent:

$$\vec{\nabla} \times \vec{j} = 0$$

ce ne conduce la ecuația ce guvernează potențialul scalar:

$$\Delta\Phi = \vec{\nabla}(\vec{v} \times \vec{B})$$

Prin urmare, densitatea de forță Lorentz poate fi scrisă ca:

$$\vec{f}_L = -\sigma\vec{\nabla}\Phi \times \vec{B} + \sigma(\vec{v} \times \vec{B}) \times \vec{B}$$

Prima componentă a forței Lorentz reprezintă componenta acceleratoare și este cea care generează curgerea azimutală. Cea de-a doua componentă reprezintă forța electromotoare și este cea care se opune întotdeauna mișcării fluidului generată de componenta acceleratoare.

Pereții creuzetului și suprafața liberă a topiturii sunt izolați electric ( $j_n = 0$ ) cu excepția elementelor de suprafață unde electrozii ating topitura pentru care  $\nabla|_n\Phi = -\frac{j_n}{\sigma}$ , unde  $j_n$  este densitatea de curent electric aplicat care trece prin cei doi electrozi.

Vitezele fluidului de-a lungul frontierelor creuzetului și cristalului sunt fixate la  $\vec{v} = 0$ . La suprafața topiturii se aplică o condiție de suprafață liberă.

Temperatura este fixată de-a lungul pereților laterali și în partea inferioară. S-a folosit un gradient de temperatura de 3 K/cm în topitură și 10 K/cm în cristal.

La suprafața liberă s-a aplicat un schimb radiativ cu mediul la o temperatură  $T_{ref}=1785$  K. La interfața solid-lichid se ia în considerare producția de căldură latentă:

$$k_s \frac{\partial T}{\partial n} - k_l \frac{\partial T}{\partial n} = \rho_s u_g \Delta H$$

unde  $k_s$  și  $k_l$  sunt conductivitățile termice ale cristalului și topiturii de siliciu,  $u_g$  este viteza de creștere fixată la 10 mm/h pentru toate simulările efectuate și  $\Delta H$  este căldura latentă.

De asemenea, la interfața solid-lichid, s-a luat în considerare segregarea impurităților:

$$\rho_s D_s \nabla c|_s - \rho_l D_l \nabla c|_l = (1 - K) u_g c_l \rho_s$$

dar concentrația de impurități se calculează doar în faza lichidă. Coeficientul de segregare,  $K$ , a fost fixat la valoarea caracteristică pentru carbon,  $7 \cdot 10^{-2}$  [4]. Pentru coeficientul de difuzie din topitură,  $D_l$ , s-au luat în considerare patru valori diferite:  $0.5 \cdot 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s,  $2 \cdot 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s,  $3 \cdot 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s și  $5 \cdot 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s, care reprezintă valori caracteristice ale impurităților ce se găsesc în lingourile de siliciu multicristalin obținute prin metoda solidificării direcționale.

Concentrația de impurități este fixată de-a lungul pereților laterali la  $9 \cdot 10^{24}$  atomi/m<sup>3</sup> care reprezintă limita de solubilitate a carbonului în siliciu.

Pentru ecuația de difuzie, s-a utilizat o condiție pe frontiera de flux zero ( $\frac{\partial c}{\partial n} = 0$ ) la suprafața liberă.

Concentrația inițială din topitură a fost fixată la zero.

Proprietățile tuturor materialelor folosite în simulări sunt date în Tabelul 2.

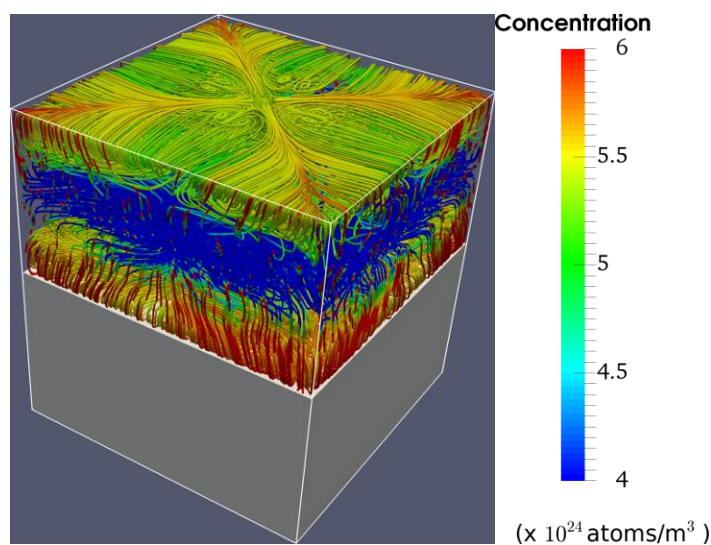
| Proprietăți fizice                 | Valoare              | Unitate           |
|------------------------------------|----------------------|-------------------|
| <b>Si topitură</b>                 |                      |                   |
| Densitate                          | $2.52 \cdot 10^3$    | kg/m <sup>3</sup> |
| Vâscozitate dinamică               | $7.56 \cdot 10^{-4}$ | Ns/m <sup>2</sup> |
| Conductivitate termică             | 60.6                 | W/mK              |
| Căldura specifică                  | 911                  | J/kgK             |
| Coeficientul de expansiune termică | $1.44 \cdot 10^{-4}$ | K <sup>-1</sup>   |
| Coeficientul Marangoni             | $-4 \cdot 10^{-4}$   | N/Km              |
| <b>Si solid</b>                    |                      |                   |

|                                    |                      |                   |
|------------------------------------|----------------------|-------------------|
| Densitate                          | $2.52 \cdot 10^3$    | kg/m <sup>3</sup> |
| Conductivitate termică             | 22                   | W/mK              |
| Căldura specifică                  | 927                  | J/kgK             |
| Coeficientul de expansiune termică | $1.44 \cdot 10^{-4}$ | K <sup>-1</sup>   |
| Căldura latentă                    | $158.7 \cdot 10^4$   | J/kg              |

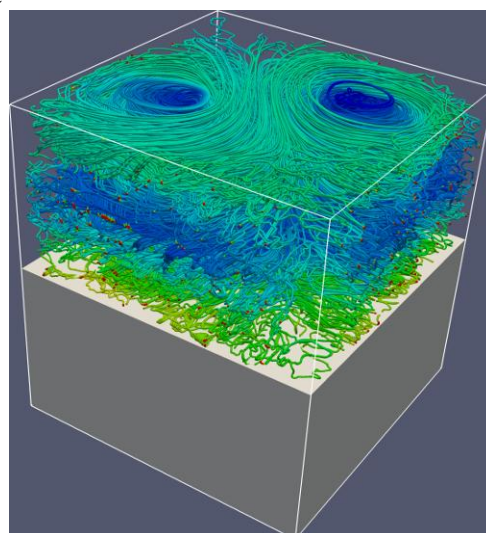
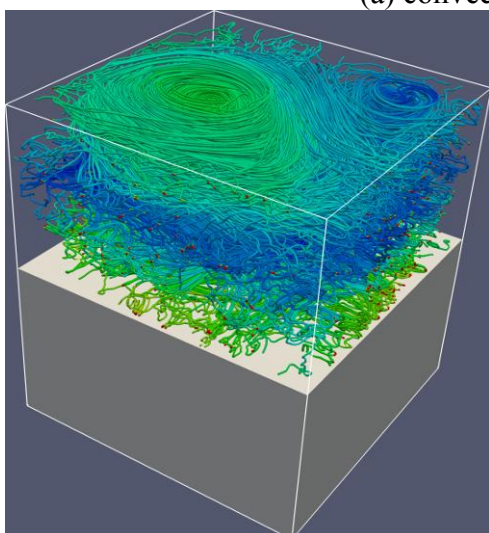
Domeniul computațional este împărțit în două secțiuni cu o rafinare a rețelei la pereți, pentru a rezolva stratul limită. Rețeaua conține 396000 de volume de control. O procedura de detectare a fazei la frontieră este implementată în STHAMAS3D care permite, după fiecare pas de timp, o regenerare a rețelei astfel încât granița dintre lichid și solid să corespundă întotdeauna temperaturii de topire. Simularea s-a extins pe 500 s în timp real, cu un pas de timp de 0.1 s.

Au fost considerate două valori ale inducției magnetice B, 10 mT și 20 mT, și au fost folosite trei valori pentru intensitatea curentului electric, I, 2A, 5A și 10A.

Distribuția de impurități din topitură a fost mai întâi calculată pentru un caz unde a fost considerată doar convecția naturală. Într-un studiu anterior [A. Popescu, D. Vizman, Crystal Growth & Design, 12 (2012), 320-325] s-a arătat că pentru un gradient de temperatura de 3 K/cm în cristal, și o rata de creștere de 10 mm/h, regăsim două zone principale de convecție în topitura: una la suprafața liberă a topiturii și una în apropierea interfeței lichid-solid. În ambele zone apar bucle de convecție care transportă impuritățile de la pereții creuzetului în topitura. După cum s-a arătat anterior, cele două zone principale de convecție sunt complet separate, ceea ce duce la o amestecare insuficientă în partea mediană a topiturii. Acest comportament poate fi observat în Figura 28(a). Concentrația de impurități este ridicată în apropierea suprafeței libere a topiturii și aproape de interfața solid-lichid și între aceste două părți o zonă de concentrație joasă este interpusă.



(a) convecție naturală



(b) configurație asimetrică

(c) configurație simetrică

Figura 28. Distribuția de impurități la 200 s în cazul convecției naturale (a) și în cazul convecției forțate generată de un câmp electromagnetic cu o poziționare (a) asimetrică și (b) simetrică a electrozilor la suprafața liberă a topiturii

Atunci când se aplică un câmp magnetic extern combinat cu un curent electric observăm că pentru ambele configurații ale electrozilor folosite în simulare (Figura 28(b) și Figura 28 (c)) se formează vortexuri în jurul electrozilor care duc la o amestecare mai bună a topiturii și, prin urmare, impuritățile sunt mai bine distribuite în topitură. Figura 29 și Figura 30 arată că omogenizarea completă a impurităților este atinsă după 300-400 s, în funcție de coeficientul de difuzie.

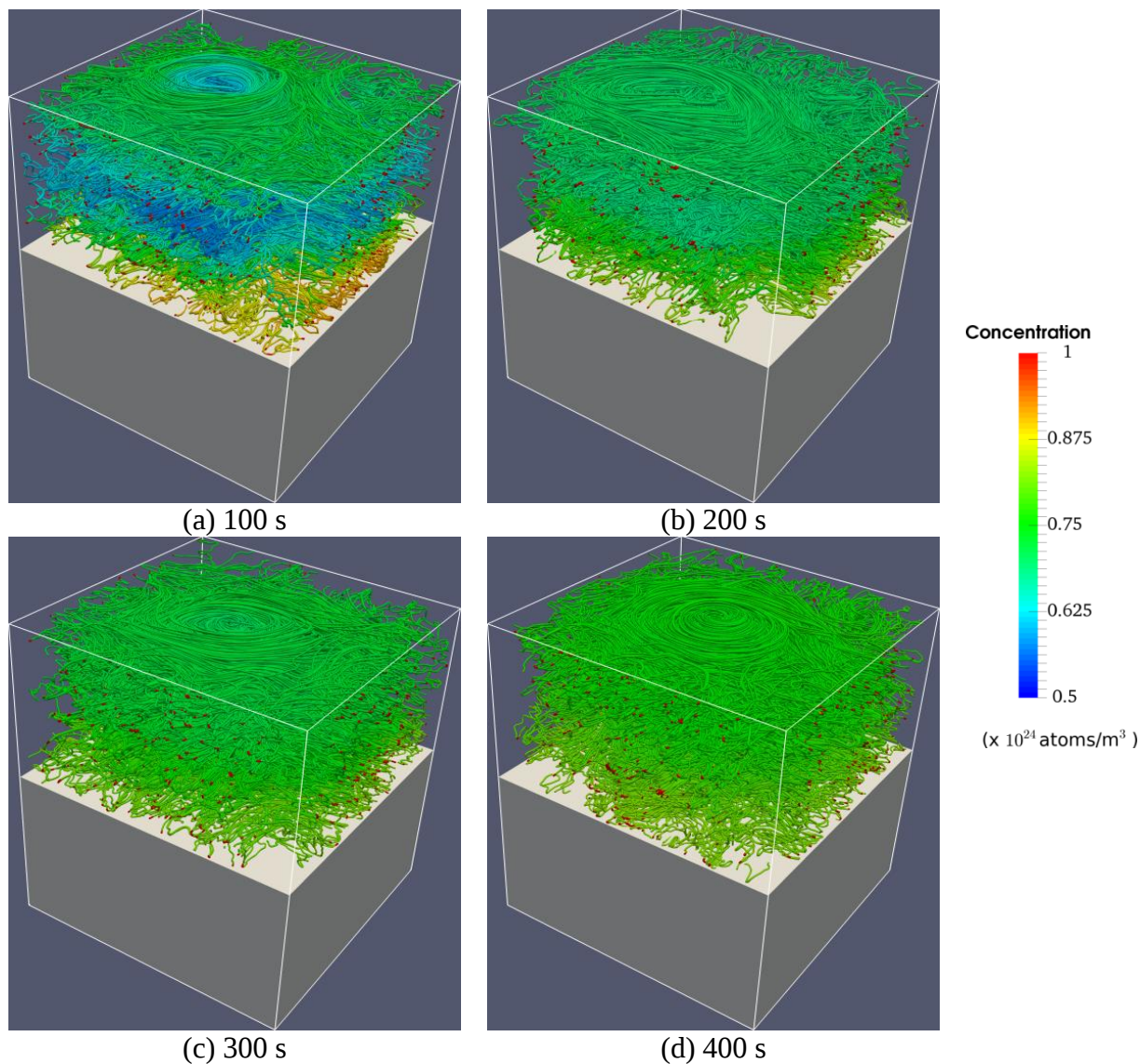


Figura 29. Evoluția în timp a distribuției de impurități pentru  $D_1 = 0.5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  și  $I = 5 \text{ A}$ ,  $B = 10 \text{ mT}$  în cazul configurației asimetrice a electrozilor

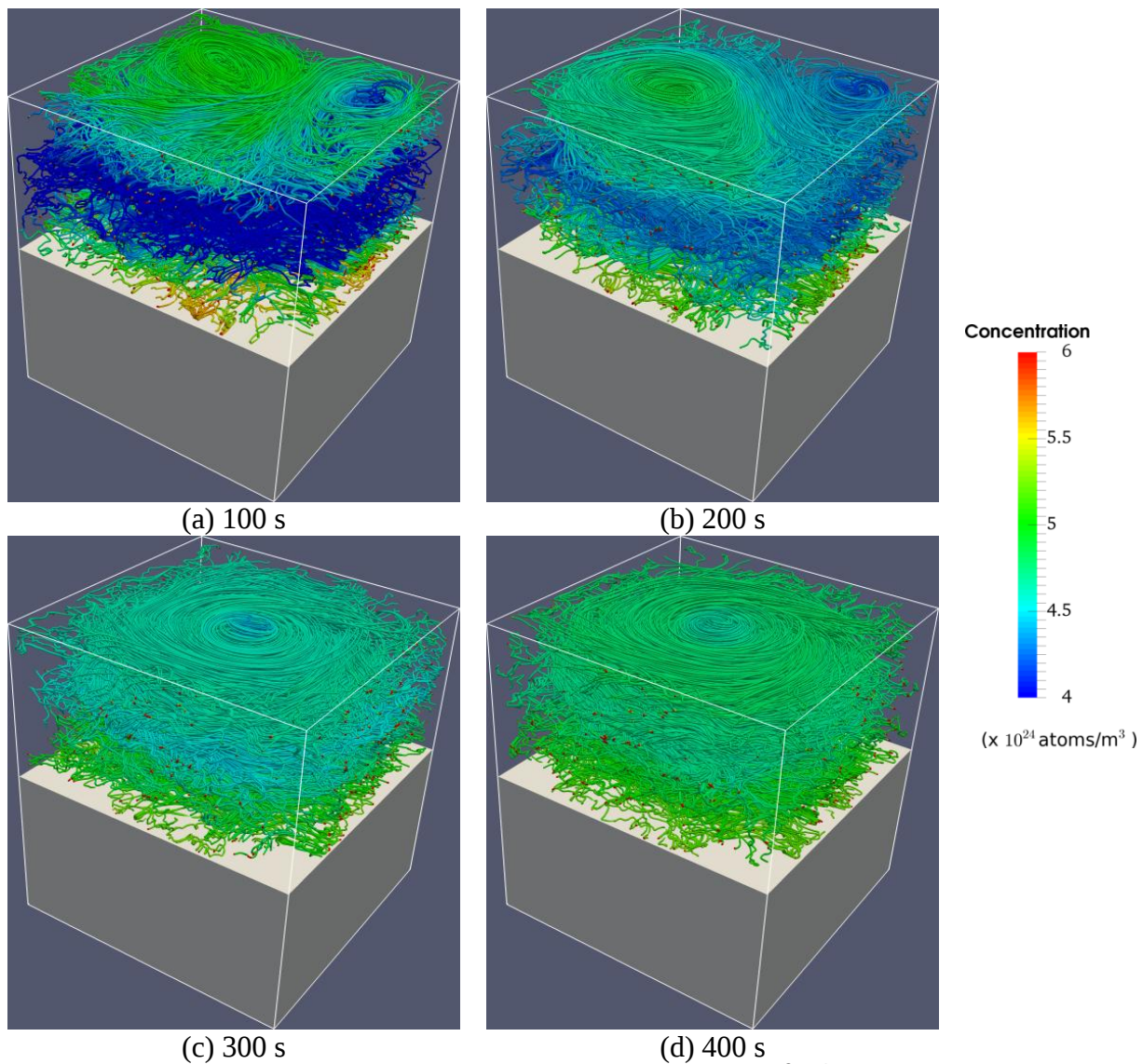


Figura 30. Evoluția în timp a distribuției de impurități pentru  $D_1 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  și  $I = 5 \text{ A}$ ,  $B = 10 \text{ mT}$  în cazul configurației asimetrice a electrozilor

Figura 29 arată că impuritățile cu un coeficient de difuzie mai mic sunt amestecate în topitura mai rapid, și astfel după 300 s se atinge o amestecare completă, pe când impuritățile cu un coeficient de difuzie mai mare sunt amestecate mai greu în topitura după cum se observă în Figura 30. Deoarece valoarea concentrației este foarte dependentă de coeficientul de difuzie, s-au folosit scale diferite pentru valori diferite ale coeficientului de difuzie.

Într-o regiune din apropierea interfeței solid-lichid, în prezența câmpului electromagnetic, se poate observa că structura clasică de convecție, care apare în cazul convecției naturale (Figura 31 (a)) este alterată odată cu aplicarea câmpului electromagnetic (Figura 31 (b)). După 100 s, vortexul care se formează la suprafața liberă a topiturii în jurul electrozilor deja s-a propagat în jos, spre zona interfeței solid-lichid și impuritățile au început să fie omogenizate în topitură și de asemenea se observă o scădere a concentrației în aceasta zona (Figura 31 (c)). În final, după 400 s, se realizează o amestecare completă a topiturii, impuritățile fiind uniform distribuite în topitură, chiar și în apropierea interfeței solid-lichid (Figura 31 (d)).

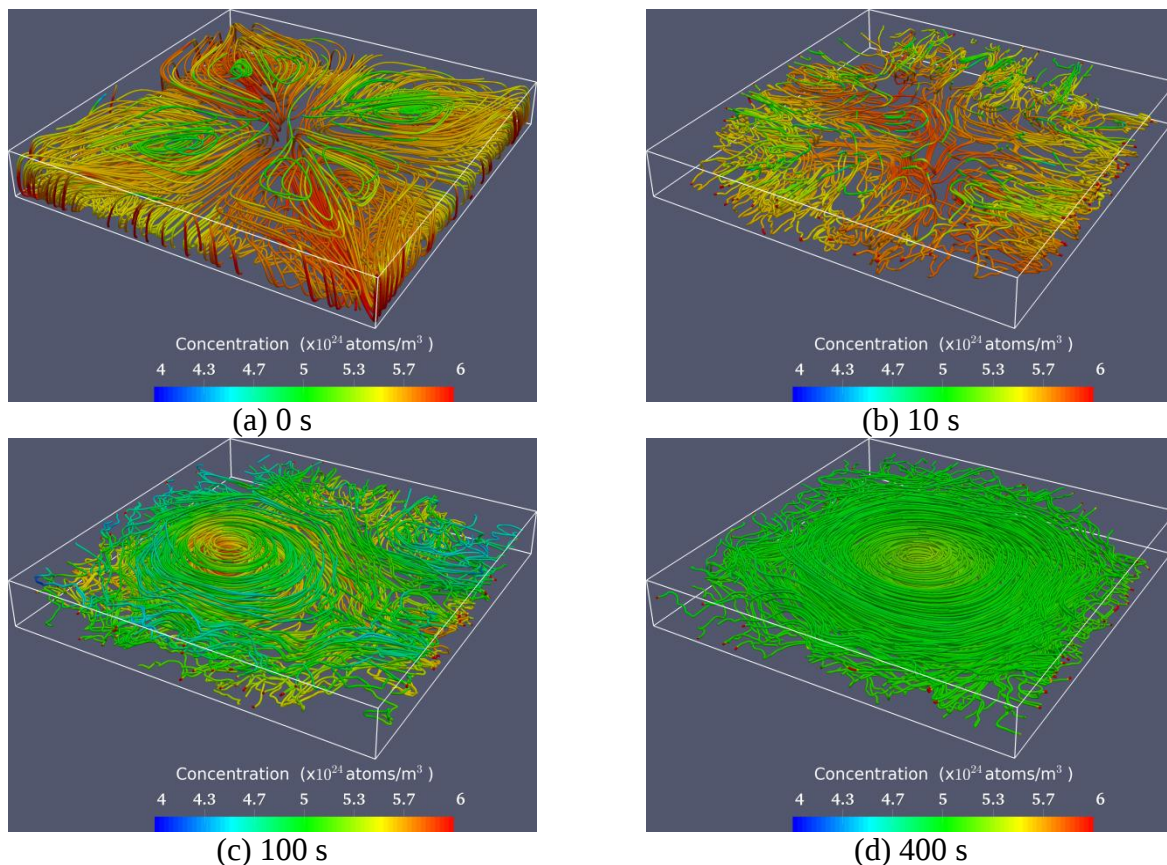
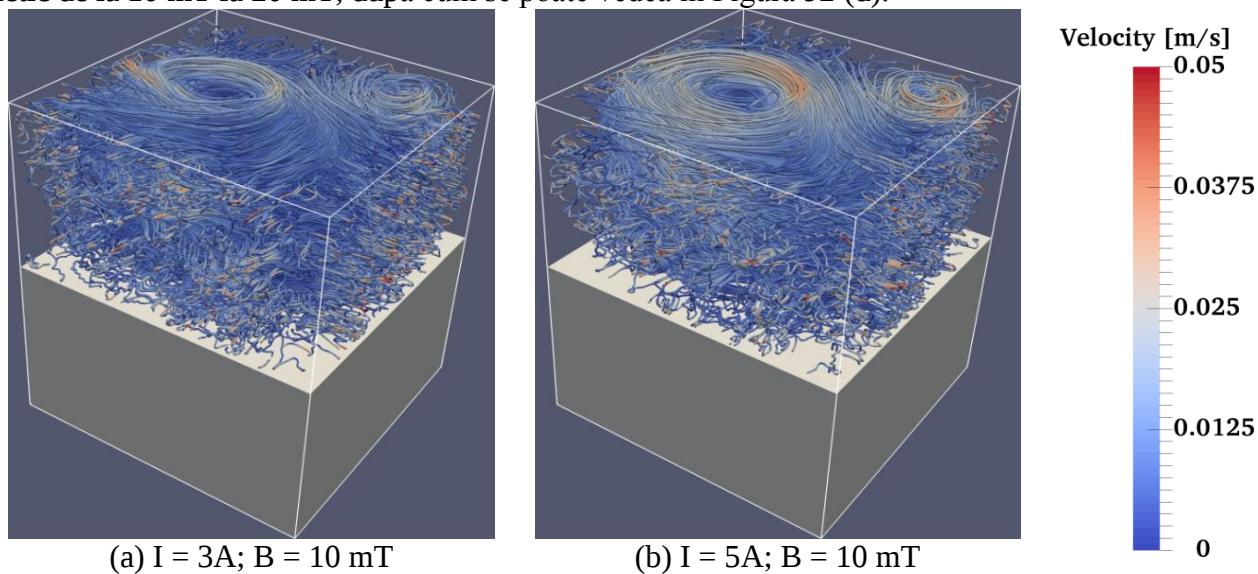
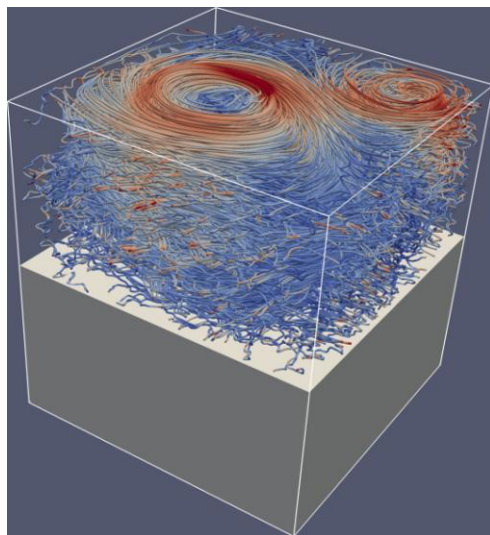


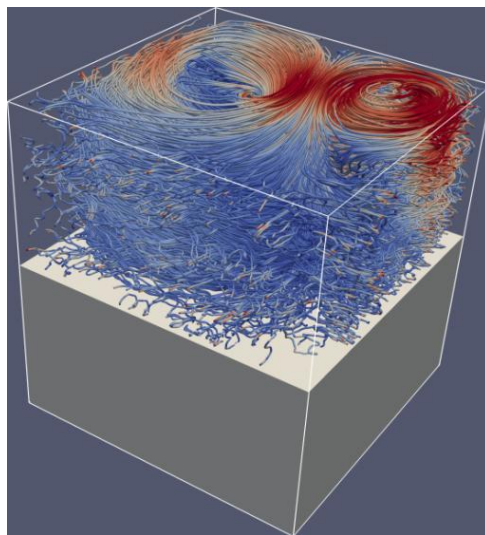
Figura 31. Grafice de particle tracking, deasupra interfeței solid-lichid la diferite momente de timp pentru cazul  $I = 5$ ;  $B = 10$  mT, poziționarea AC a electrozilor

Prin creșterea valorii intensității curentului electric de la 3A la 5A și apoi la 10A, Figurile 32 (a), (b) și (c) arată că viteza topiturii crește odată cu intensitatea curentului ( $I$ ), în special la suprafața liberă a topiturii în jurul celor doi electrozi. De asemenea, se observă o creștere a vitezei odată cu creșterea câmpului magnetic de la 10 mT la 20 mT, după cum se poate vedea în Figura 32 (d).





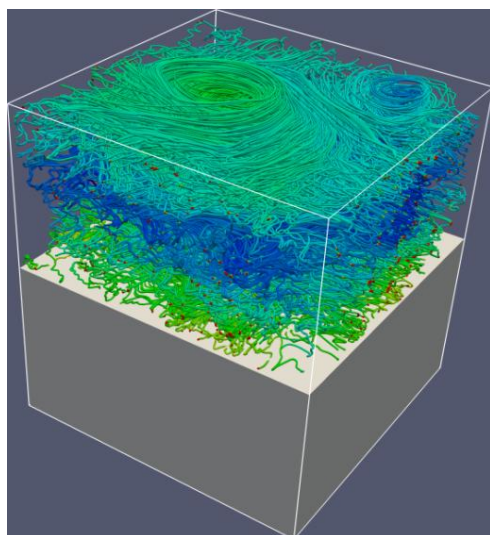
(c)  $I = 10\text{A}$ ;  $B = 10\text{ mT}$



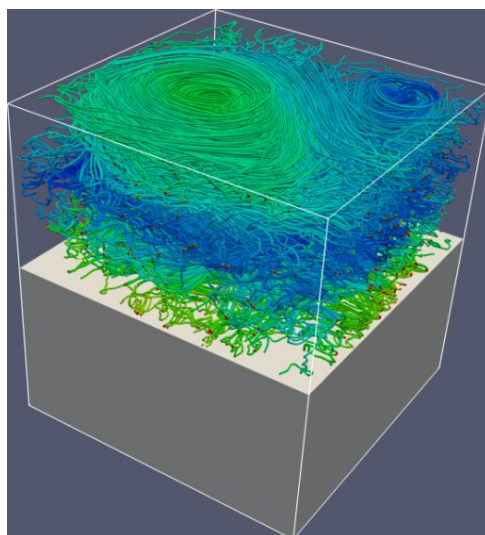
(d)  $I = 10\text{A}$ ;  $B = 20\text{ mT}$

Figura 32. Grafice de particle tracking, după 200 s, pentru diferiți parametri ai câmpului electromagnetic utilizând configurația asimetrică a electrozilor și  $D_1 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$

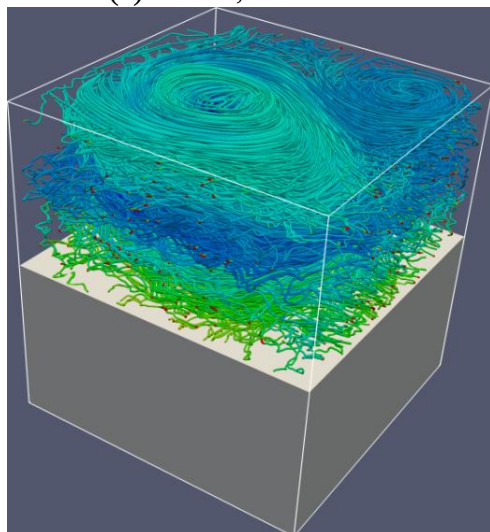
Totuși, creșterea în viteză nu are o influență semnificativă asupra distribuției impurităților în volumul topiturii. Se poate observa din Figura 33 că pentru toți parametrii considerați în acest studiu distribuția de concentrație nu se modifică semnificativ când se variază fie  $I$ , fie  $B$ . Acest lucru poate fi explicat prin faptul că nu se observă o modificare a structurii de curgere în regimul parametric considerat.



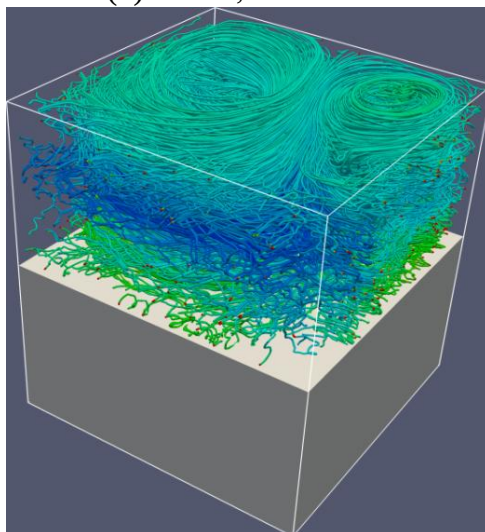
(a)  $I = 3\text{A}$ ;  $B = 10\text{ mT}$



(b)  $I = 5\text{A}$ ;  $B = 10\text{ mT}$



(c)  $I = 10\text{A}$ ;  $B = 10\text{ mT}$



(d)  $I = 10\text{A}$ ;  $B = 20\text{ mT}$

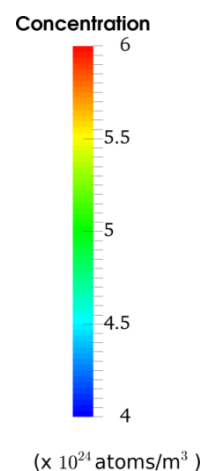


Figura33. Grafice de particle tracking, după 200 s, pentru diferiți parametri ai câmpului electromagnetic

Pentru a studia efectele câmpului electromagnetic asupra creuzetului, rata de disoluție,  $R$ , a fost estimată din masa totală de impurități ( $m_{\text{imp}} = \int_V c \, dV$ ) ce se află în topitură după o perioadă de timp:

$$R = \frac{m_{\text{imp}}}{\Delta t}$$

În Figura 34 rata de disoluție este reprezentată în funcție de coeficientul de difuzie, pentru  $I = 5 \text{ A}$  și  $B = 10 \text{ mT}$ . Pentru comparație, rata de disoluție a creuzetului a fost calculată în cazul convecției naturale.

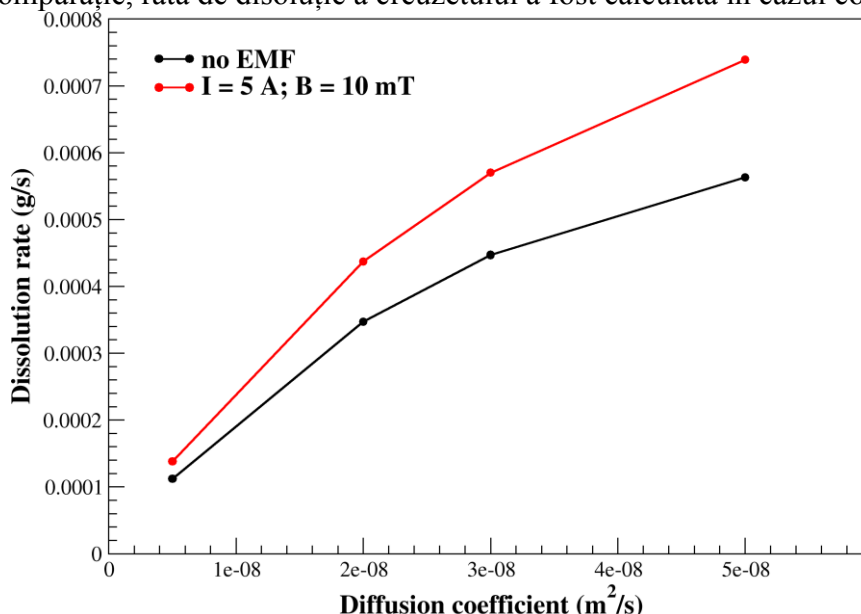


Figura 35. Rata de disoluție a creuzetului în cazul convecției naturale și a convecției forțate

Din Figura 35 se evidențiază dependența ratei de disoluție de valoarea coeficientului de difuzie. Aceasta crește de la 0.138 mg/s, pentru  $D = 0.5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ , la 0.74 mg/s pentru  $D = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  în prezența câmpului electromagnetic. Un trend similar se observa pentru cazul convecției naturale, cu o creștere de la 0.112 mg/s, pentru  $D = 0.5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ , la 0.563 mg/s pentru  $D = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ . Creșterea ușoară a ratei de disoluție în prezența câmpului electromagnetic poate fi atribuită vitezei maxime care este cu două ordine de mărime mai mare în cazul convecției forțate (0.7 cm/s în cazul convecției naturale și 10 cm/s în prezența câmpului electromagnetic).

În graficele prezentate anterior am reprezentat distribuțiile de impurități doar pentru valorile extreme ale coeficienților de difuzie, dar concluziile sunt valabile și pentru valorile intermediare ale acestor coeficienți.

În concluzie, în cadrul acestui obiectiv, s-au studiat influența convecției forțate, generată prin combinarea unui curent electric cu un câmp magnetic, asupra distribuției impurităților și ratei de disoluție a creuzetului, folosind modelarea numerică, pentru un proces de solidificare direcțională a siliciului multicristalin. Din rezultatele obținute se observă o propagare rapidă în jos a curgerii rotaționale generată de câmpul electromagnetic până la interfața solid-lichid, lucru care duce la omogenizarea completă a impurităților din topitură după o perioadă scurtă de timp (300-400 s). Aceste rezultate arată de asemenea o creștere a vitezei fluidului sub influența câmpului electromagnetic, în comparație cu cazul convecției naturale, care, la rândul ei, va duce la o creștere a ratei de disoluție a creuzetului de maximum 30%.

Pentru a avea o imagine completă a influenței diversilor parametri ce pot interveni în cadrul solidificării unui lingou de siliciu, în cadrul acestei activități s-au menținut constante valorile curentului electric,  $I = 5 \text{ A}$ , a câmpului magnetic,  $B = 10 \text{ mT}$  și a coeficientului de difuzie,  $D = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ , variindu-se în schimb valorile gradientului de temperatură din topitură și a ratei de creștere. Pentru aceasta s-au utilizat două valori ale gradientului termic din topitură  $G_m = 2 \text{ K/cm}$  și  $G_m = 4 \text{ K/cm}$  pentru o valoare constantă a ratei de creștere  $v_g = 10 \text{ mm/h}$ , respectiv două valori ale a ratei de creștere  $v_g = 5 \text{ mm/h}$  și  $v_g = 15 \text{ mm/h}$ , menținând o valoare constantă a gradientului termic din topitură  $G_m = 3 \text{ K/cm}$ . Valorile alese pentru gradientul din topitură, respectiv pentru rata de creștere, reprezintă valori tipice minime ( $G_m = 2 \text{ K/cm}$  sau  $v_g = 5 \text{ mm/h}$ ) sau maxime ( $G_m = 4 \text{ K/cm}$  sau  $v_g = 15 \text{ mm/h}$ ) în cazul solidificării direcționale a siliciului multicristalin pentru aplicații fotovoltaice.

În primul rând, se poate observa că distribuția vitezelor, după 300 s, nu se modifică în mod semnificativ nici ca structură și nici ca valori maxime, atât în cazul dublării gradientilor termici din topitură de la 2 K/cm în Figura 36 (a) la 4 K/cm în Figura 36 (b) pentru o rată constantă de creștere cât și în cazul triplării ratei de creștere de la 5 mm/h în Figura 37 (a) la 15 mm/h în Figura 37 (b) pentru un gradient termic constatat în topitură. Acest fapt arată că influența majoră asupra structurii de curgere în topitură este datorată convecției forțate rezultate în urma amestecului electromagnetic, pentru plaja de valori aleasă a ratei de creștere, gradientului de temperatură din topitură și a curentului electric și câmpul magnetic utilizate pentru realizarea amestecului. După cum s-a mai constatat pentru o configurație asimetrică a electrozilor, structura de curgere este dominată de o curgere de tip vortex în jurul electrodului central, pentru valori medii ale gradientului termic din topitură (3 K/cm) și a ratei de creștere a lingoului (10 mm/h) specifice solidificării direcționale a siliciului multicristalin pentru aplicații fotovoltaice. Deoarece structura de curgere și valorile tipice ale vitezei nu depind în mod fundamental în cazul utilizării acestor parametri de amestec electromagnetic, această alegere ne permite să observăm influența exclusivă asupra interfeței de solidificare și a distribuției impurităților a valorilor minime și maxime tipice ale gradientului termic din topitură și a ratei de creștere a lingourilor de siliciu utilizate în practică.

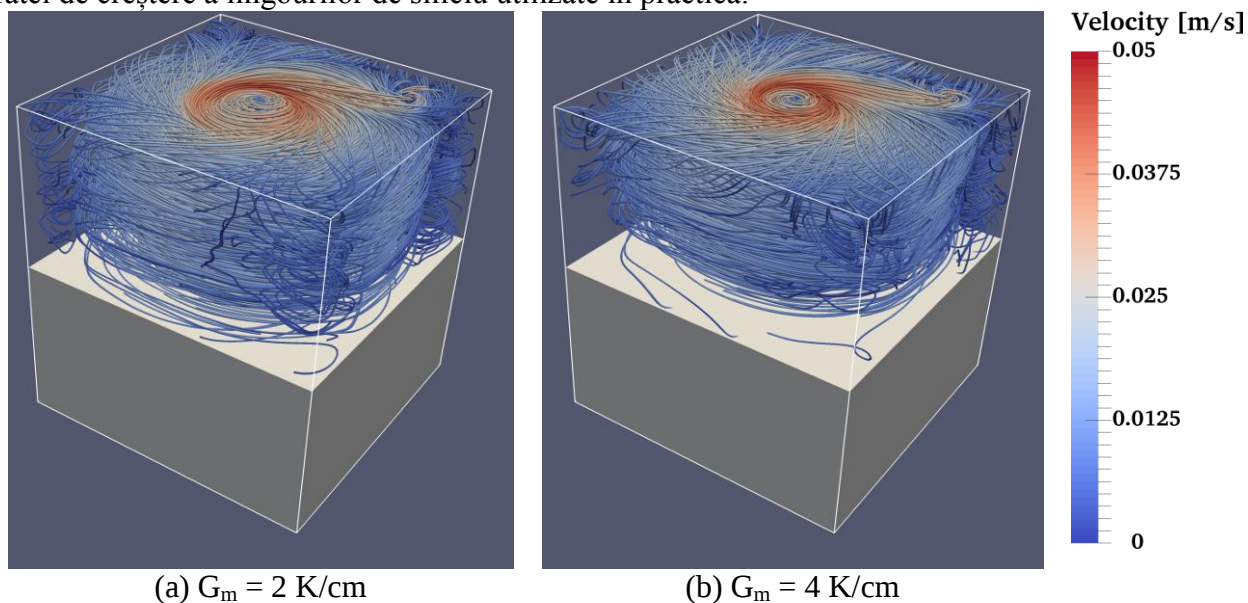


Figura 36. Grafice de particle tracking, după 300 s, pentru două valori ale gradientului termic în topitură, utilizând pentru  $v_g = 10 \text{ mm/h}$

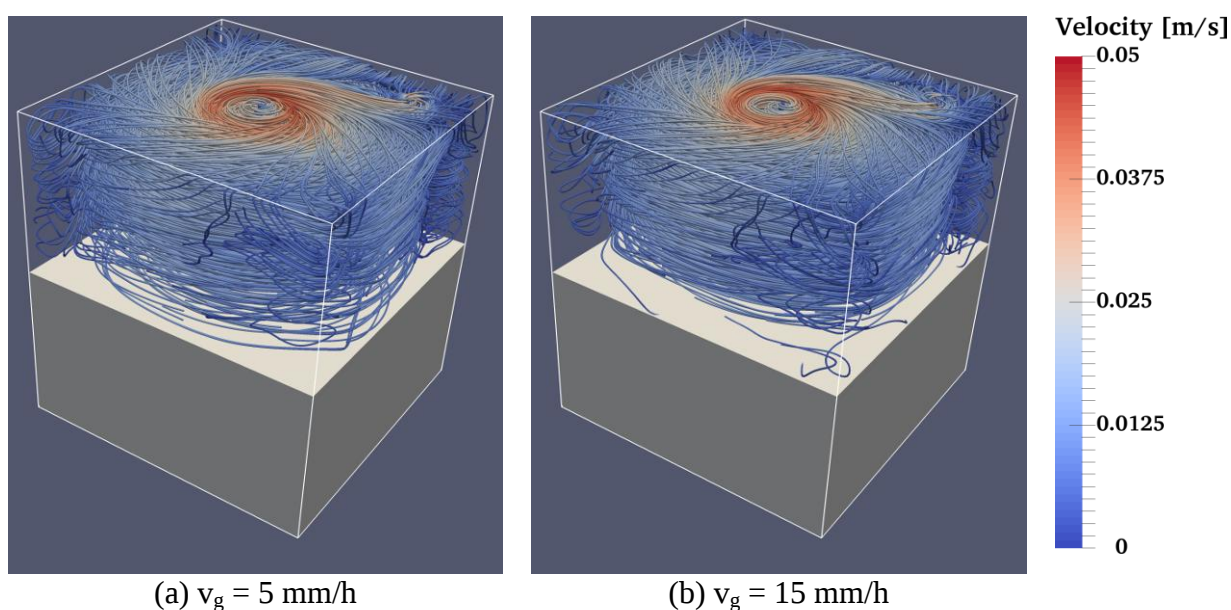


Figura 37. Grafice de particle tracking, după 300 s, pentru două valori ale ratei de creștere, pentru  $G_m = 3 \text{ K/cm}$

În Figura 38, se poate observa deflecția interfeței de solidificare pentru patru perechi de valori ale ratei de creștere și a gradientului termic în topitură: ( $v_g = 5$  mm/h;  $G_m = 3$  K/cm), ( $v_g = 15$  mm/h;  $G_m = 3$  K/cm), ( $G_m = 2$  K/cm;  $v_g = 10$  mm/h), ( $G_m = 4$  K/cm;  $v_g = 10$  mm/h). Se poate observa că pentru 2 cazuri, ( $v_g = 5$  mm/h;  $G_m = 3$  K/cm) și ( $v_g = 10$  mm/h;  $G_m = 2$  K/cm), deflecția este pozitivă, interfața de solidificare având o curbă convexă, iar pentru celelalte 2 cazuri: ( $v_g = 15$  mm/h;  $G_m = 3$  K/cm) și ( $G_m = 4$  K/cm;  $v_g = 10$  mm/h), deflecția este negativă, interfața de solidificare având o curbă concavă. Astfel, în cazul gradientilor termici în topitură sau a ratelor de creștere a lingourilor mai mici, convecția forțată obținută electromagnetic este suficient de mare pentru a transporta căldura dinspre interfață înspre partea de sus a topiturii (curgerea în partea de mijloc a vortexului central este orientată în sus ceea ce duce la temperaturi mai mici în mijlocul topiturii decât pe margine, solidificarea având loc mai întâi în mijloc. În schimb, în cazul gradientilor termici în topitură sau a ratelor de creștere a lingourilor mai mari, convecția forțată obținută electromagnetic nu este suficient de mare pentru a transporta în sus căldura mai mare asociată gradientilor mai mari sau a căldurii latente de solidificare generată mai repede la interfață la viteze mai mari, dinspre interfață în sus, ceea ce duce la temperaturi mai mari în mijlocul topiturii decât pe margine, solidificarea având loc mai întâi pe margini.

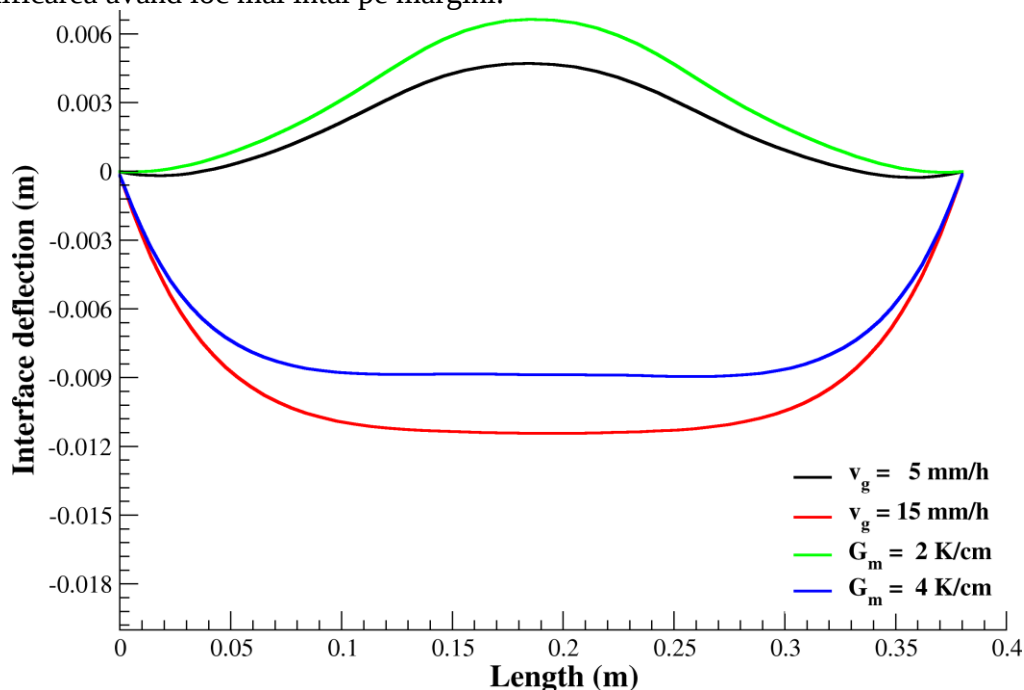


Figura 38. Deflecția interfeței de solidificare, după 500 s, pentru două valori ale ratei de creștere menținând constant gradientul termic în topitură  $G_m = 3$  K/cm, respectiv pentru două valori ale gradientului termic în topitură, menținând constantă ratei de creștere  $v_g = 10$  mm/h

În Figura 39, este ilustrată evoluția în timp a distribuției de impurități pentru cazul cu cel mai mic gradient termic în topitură. După 100 s de amestec electromagnetic, din Figura 39 (a) se poate observa că distribuția în concentrație a impurităților nu este omogenă, aceasta fiind mai mare în zonele apropiată de interfața de solidificare, respectiv de suprafața liberă, la fel ca și în cazul convecției naturale. Totuși se poate observa o concentrație mai redusă în cazul structurii de tip vortex ce apare în dreptul fiecărui electrod, datorată efectului amestecului electromagnetic. După 500 s, se poate observa din Figura 39(d) că amestecul electromagnetic a omogenizat aproape complet distribuția impurităților. Acest comportament este specific tuturor cazurilor studiate.

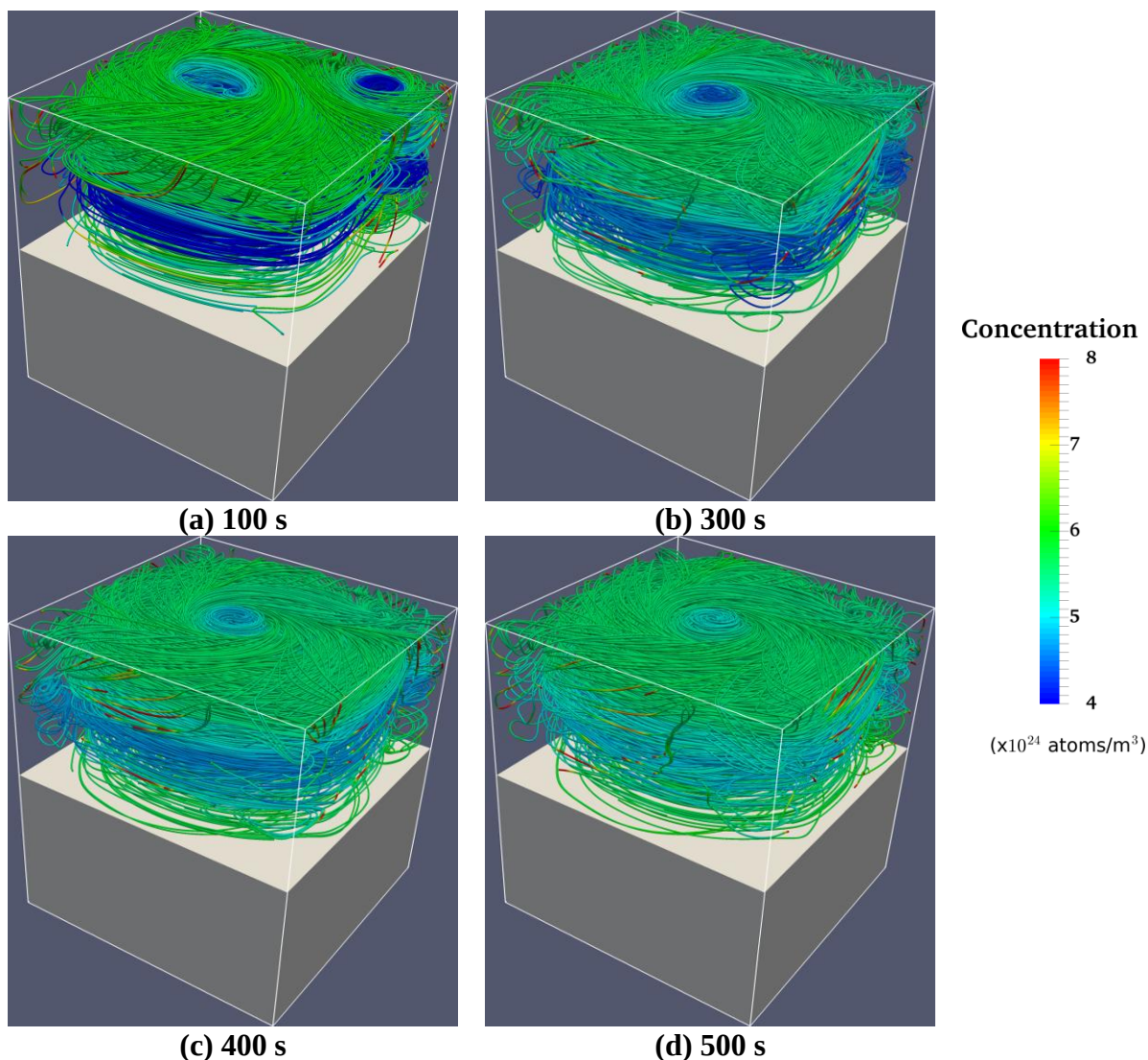


Figura 39. Evoluția în timp a distribuției de impurități pentru  $G_m = 2 \text{ K/cm}$  și  $v_g = 10 \text{ mm/h}$

În Figura 40 se poate observa distribuția impurităților aproape de interfața de solidificare în cazul modificării atât a gradientului termic din topitură în cazurile (a) și (b), cât și a ratei de creștere a lingoului, în cazurile (c) și (d). Concentrația de impurități este mai crescută în cazurile (b) și (d), ce corespund unui gradient termic, respectiv unei rate de solidificare mai mari, în special în partea centrală a topiturii, în dreptul structurii de vortex. Acest lucru poate fi explicat prin prisma observațiilor din Figura 38, aceste 2 cazuri prezentând o interfață cu o formă concavă. În urma fenomenului de segregare a impurităților la nivelul interfeței de solidificare, acestea sunt respinse în mare parte pentru un coeficient de segregare subunitar, ca și cel ales în simulări (0.07, corespunzător carbonului). Curgerea forțată electromagnetic în cazul structurii de vortex este caracterizată printr-o rotație azimutală și una în plan meridional (care adevectează rotația azimutală formând vortexul). Curgerea în plan meridional apare ca două bucle de convecție ce coboară pe margini, converg spre mijlocul creuzetului și urcă de acolo spre suprafața liberă. Sub locul unde aceste bucle converg există o zonă slab amestecată. Aceste bucle vor mătura mai bine interfața de solidificare, dacă interfața este convexă (în cazurile (a) și (c)), zona slab amestecată fiind mai mică din cauza geometriei interfeței, transportând impuritățile respinse prin segregare. În schimb, dacă interfața este concavă (în cazurile (b) și (d)), zona slab amestecată dintre buclele de convecție va fi mai mare din cauza geometriei interfeței de solidificare.

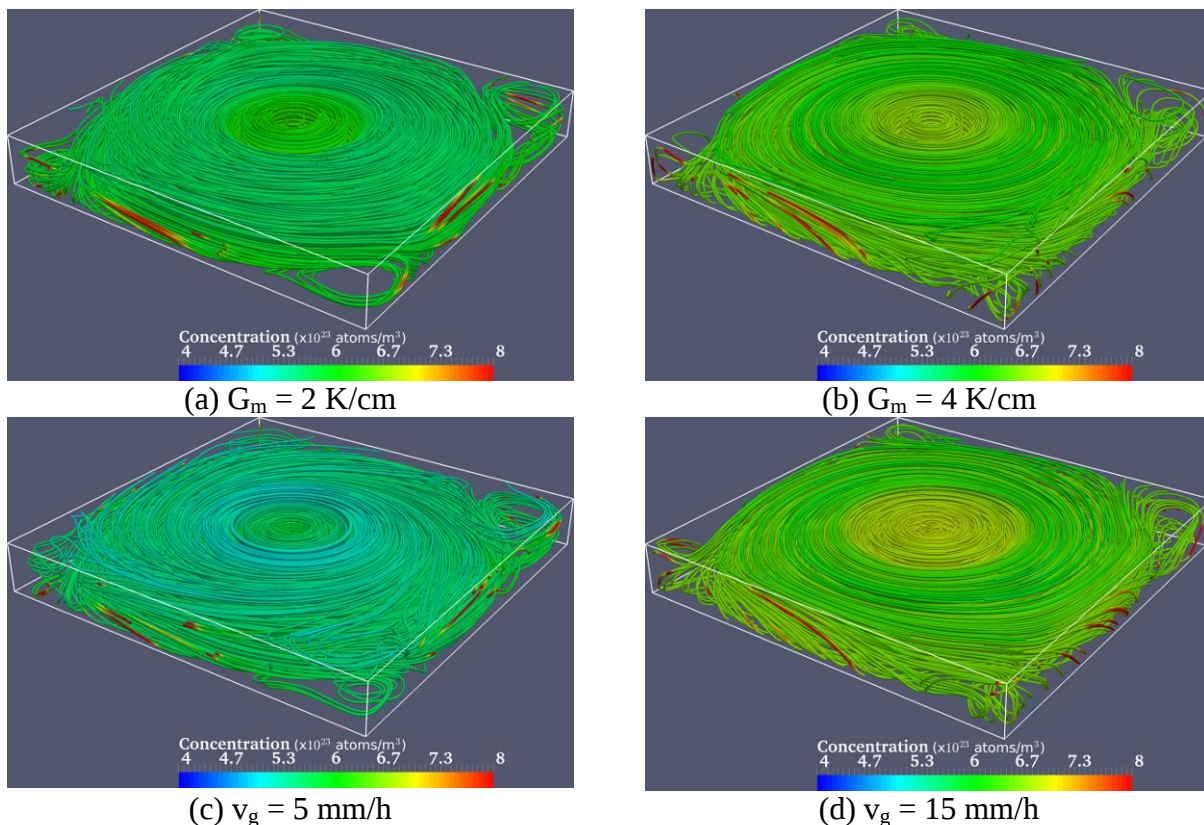


Figura 40. Grafice de particle tracking, deasupra interfeței solid-lichid, după 500 s pentru diferite rate de creștere și gradienti de temperatură

Până acum, au fost prezentate efectul modificării gradientului termic din topitură și a ratei de creștere pentru raporturi de aspect ale creuzetului ce conține ansamblul topitură-creuzet de  $38 \times 38 \times 40 \text{ cm}^3$ . În Figura 41 este prezentată structura de curgere și distribuția concentrației de impurități pentru un creuzet cu un raport de aspect de  $68 \times 68 \times 40 \text{ cm}^3$ . Din graficul de particle tracking din Figura 41 (a) se poate observa că structura de curgere rămâne dominată de vortexul central corespunzător electrodului din mijloc, deși vortexul corespunzător electrodului din colț are un rol mai pronunțat în structura de curgere de ansamblu decât în cazul unui raport de aspect mai mic (cum era cazul în Figura 36 sau 37). Distribuția impurităților din observată în Figura 41 (b) este similară ca distribuție față de cea din Figura 39, observată în cazul unui raport de aspect mai mic, însă valorile concentrației sunt cu aproximativ 25 % mai mici. Acest lucru se poate datora unui raport mai scăzut al suprafeței topiturii aflate în contact cu creuzetul, de unde provin impuritățile, față de volumul acestuia (acest raport scade de la  $4/38 \text{ cm}^{-1}$  la  $4/68 \text{ cm}^{-1}$  în cazul modificării raportului de aspect al creuzetului).

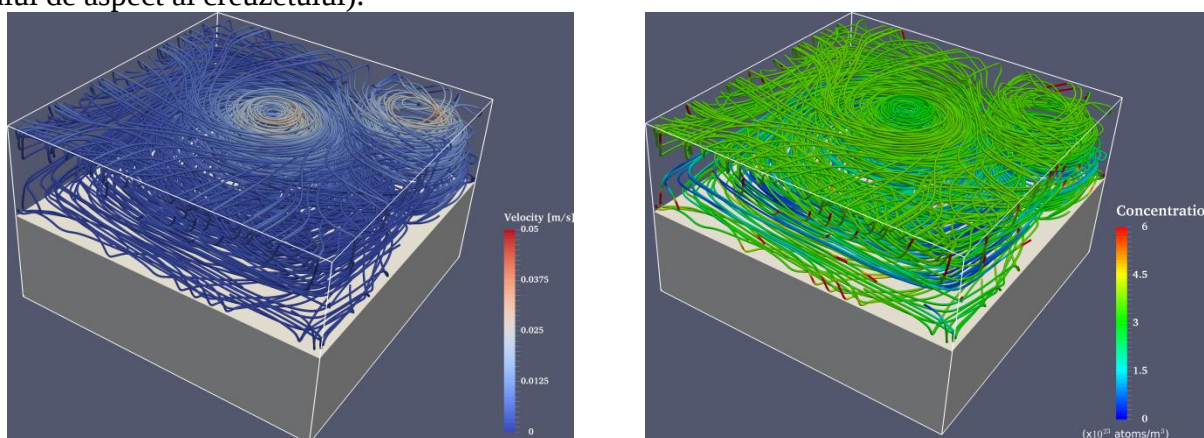


Figura 41. Grafice de particle tracking pentru  $G_m = 3 \text{ K/cm}$  și  $v_g = 10 \text{ mm/h}$  într-un creuzet cu dimensiunile de  $68 \times 68 \times 40 \text{ cm}^3$

În concluzie, studiile efectuate au relevat următoarele aspecte:

- S-a observat că pentru valori tipice minime și maxime ale gradientului termic din topitură și a ratei de creștere a lingourilor de siliciu multicristalin structura de curgere e dominată de amestecului electromagnetic la valori relativ mici ale curentului electric și a câmpului magnetic aplicate.
- La o anumită valoare a convecției forțate obținute electromagnetic deflecția interfeței poate fi concavă sau convexă în funcție de cantitatea de căldură, ce este proporțională cu gradientul și viteza de creștere ce trebuie transportată în sus. Dacă domină generarea de căldură locală asupra transportului convectiv interfața va fi concavă, iar în caz contrar ea va fi convexă.
- Distribuția impurităților se omogenizează aproape complet după 500 s indiferent de gradientul termic sau rata de solidificare. O concentrație mai mare de impurități se observă la nivelul interfeței în cazurile în care interfața este concavă, din cauza unei zone slab măturate mai mari între buclele de convecție forțată decât în cazul unei interfețe convexe.
- În cazul schimbării raportului de aspect, nu se observă diferențe majore în cazul structurii de curgere și a distribuției în concentrație a impurităților, ci în valorile tipice ale concentrației, datorate raportului mai mic între suprafața topiturii aflată în contact cu creuzetul și volumul acesteia.

## Rezultate obtinute:

### Articles

1. D. Vizman, C. Tanasie - *Novel method for melt flow control in unidirectional solidification of multi-crystalline silicon*, Journal of Crystal Growth 372, 1-8 (2013)
2. D. Vizman, K. Dadzis, J. Friedrich - *Numerical parameter studies of 3D melt flow and interface shape for directional solidification of silicon in a traveling magnetic field*, Journal of Crystal Growth 381, 169-178 (2013)
3. R. A. Negrila, A. Popescu, D. Vizman - *Numerical and experimental modelling of melt flow in a directional solidification configuration under the combined influence of electrical current and magnetic field*, European Journal of Mechanics B/Fluids 52, 147-168 (2015)
4. R. A. Negrila, A. Popescu, D. Vizman - *GaInSn melt flow structure variation with crucible size in an isothermal electromagnetic stirring configuration*, TIM 2014 Physics Conference AIP Conference Proceedings 1694, 030003 (2015)
5. A. Popescu, D. Vizman - *Influence of mechanical stirring on the crucible dissolution rate and impurities distribution in directional solidification of multicrystalline silicon*, West University of Timisoara Annals, Physics Series 58, 27-37 (2015)
6. R. A. Negrila, A. Popescu, D. Tatomirescu, D. Vizman - *Possible flow structures for two interacting electrically induced azimuthal vortices damped by a parallel steady magnetic field in a rectangular crucible at different MHD interaction parameter values*, European Journal of Mechanics B/Fluids, submitted
7. A. Popescu, D. Vizman - *Numerical study of the influence of forced melt convection on the impurities transport in a silicon directional solidification process*, Journal of Crystal Growth, submitted

### Book chapter

- D. Vizman - *Flow control by Magnetic Fields during Crystal Growth from Melt*, published in T. Nishinaga, P. Rudolph (eds.), Handbook of Crystal Growth, Vol. II, Elsevier, 909-950 (2015)

### Conferences

1. D. Vizman, C. Tanasie, R. Negrila - *Novel method for melt flow control in unidirectional solidification of multi-crystalline silicon*, 4th European Conference on Crystal Growth, Glasgow, Scotland, 2012, poster presentation

2. D. Vizman, C. Tanasie, R. Negrila - *A new type of electromagnetic stirring in directional solidification of mc-Si*, 6th International Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells, Aix les Bains, France, 2012, *poster presentation*
3. D. Vizman, A. Popescu - *Numerical study of melt convection in directional solidification method of multicrystalline silicon*, The 7th International Conference on Advanced Materials ROCAM 2012, Brasov, Romania, *invited paper*
4. R. A. Negrila, D. Vizman, T. Marian, A. Popescu - *Numerical and Experimental Studies on Melt Flow in a Model Experiment for Electromagnetic Stirring*, The 7th International Conference on Advanced Materials ROCAM 2012, Brasov, Romania, *poster presentation*
5. D. Vizman, C. Tanasie, R. Negrila - *Numerical studies on a type of electromagnetical stirring in directional solidification method of multicrystalline silicon*, 7th International Workshop on modeling in crystal growth, Taipei, Taiwan, 2012, *oral contribution*
6. R. Negrila, A. Popescu, M. Paulescu, D. Vizman - *Melt stirring based on a combination of electrical current and magnetic field*, TIM-12 Physics Conference, Timisoara, Romania, 2012, *oral contribution*
7. D. Vizman, R. Negrila - *Numerical and experimental studies on a special type of electromagnetic stirring*, The 19th American Conference on Crystal Growth and Epitaxy, Key Stone, USA, 2013, *oral contribution*
8. R.-A. Negrila, M. Paulescu, A. Popescu, D. Vizman - *Model experiment on a special type of electromagnetical stirring in a GaInSn melt*, 17th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy - ICCGE-17, Warsaw, Poland, 2013, *oral contribution*
9. R. Negrila, S. Dumitrica, A. Popescu, D. Vizman - *Model experiments on some melt stirring techniques in a rectangular crucible*, 7th International Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells, Fukuoka, Japan, 2013, *oral contribution*
10. R. A. Negrila, A. Popescu, M. Paulescu, D. Vizman, B. Barvinschi - *Comparaison between numerical and experimental results in the case of a special type of electromagnetical stirring for conducting melts*, TIM-13 Physics Conference, Timisoara, Romania, 2013, *oral contribution*
11. R. A. Negrila, V. Pupazan, O. M. Bunoiu, D. Vizman - *Influence of process time on electrical proprieties of highly polluted multi-crystalline silicon grown by Bridgman technique*, TIM-13 Physics Conference, Timisoara, Romania, 2013, *poster contribution*
12. R. Negrila, A. Popescu, D. Vizman - *Novel electromagnetic stirring technique in a direct-solidification configuration*, E-MRS 2014 Spring Meeting, Lille, France, 2014, *oral contribution*
13. R. A. Negrila, A. Popescu, M. Paulescu, D. Vizman - *Control of convective flows in a rectangular crucible by a special type of electromagnetical stirring*, 9th PAMIR International Conference, Fundamental and Applied MHD, Riga, Latvia, 2014, *poster contribution*
14. R. A. Negrila, A. Popescu, D. Vizman - *Melt flow structure variation with crucible size in an isothermal electromagnetic stirring configuration for silicon directional solidification*, 8th International Workshop on Crystalline Silicon for Solar Cells, Bamberg, Germany, 2015, *poster contribution*
15. D. Vizman, R. A. Negrila, A. Popescu - *Magnetohydrodynamic effects in a novel electromagnetical stirring configuration*, 9th International Conference on the Balkan Physical Union, Istanbul, Turkey, 2015, *oral contribution*
16. R. A. Negrila, A. Popescu, D. Vizman - *Numerical modeling and experimental validation of electromagnetical stirring in unidirectional solidification of multicrystalline silicon*, 5th European Conference on Crystal Growth, Bologna, Italy, 2015, *oral contribution*
17. A. Popescu, D. Vizman - *Numerical Study of the Influence of Forced Melt Convection on the Impurities Transport in a Silicon Directional Solidification Process*, 8th International Workshop on Modelling in Crystal Growth, Spa, Belgium, 2015, *oral contribution*

18. D.Vizman, A. Popescu, *Numerical study of the influence of electromagnetic stirring on the impurities transport in a silicon directional solidification process*, The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy, Nagoya, Japan, 2016, *oral contribution*
19. D. Vizman, A. Popescu, *Electromagnetic stirring in directional solidification of multicrystalline silicon*, 16th International Balkan Workshop on Applied Physics and Materials Science, *invited contribution*

### ***Other results***

- Project proposal H2020 (Proposal 654152-2) - second stage LocoPV Lowest Cost Silicon Photovoltaics
- Ph. D. Thesis, Radu Andrei Negrila - *The numerical and experimental study of a melt flow under the influence of a special type of electromagnetic field in a model experiment*