

# Uticaj električne provodnosti vode na fenomen nesjedinjavanja naelektrisanih kapljica

---

*Pored jednostavnih elektrostatičkih interakcija, električno polje može imati i drugačiji uticaj na ponašanje kapljica. Primer je nesjedinjavanje kapljica sa površinom tečnosti gde se kapljica, u zavisnosti od jačine električnog polja u kome se nalazi, različito ponaša pri kontaktu sa površinom tečnosti. Jedan od faktora koji uslovljavaju ovu pojavu je električna provodnost vode. U ovom radu je ispitivano na koje načine provodnost utiče na ovaj fenomen. Ustanovljeno je da postoje dva podprocesa koja se odlikuju razmenama naelektrisanja i direktno zavise od provodnosti vode.*

---

## Uvod

Fenomen nesjedinjavanja kapi se odnosi na pojave koje se odvijaju pri kontaktu kapi sa površinom tečnosti (Ristenpart *et al.* 2009). Ovaj fenomen je karakterističan za naelektrisane kapi. U normalnim uslovima bi kontakt rezultirao sjedinjavanjem kapi sa ostatkom tečnosti. Ukoliko je kap naelektrisana i ceo sistem se nalazi u električnom polju može doći i do drugačijeg ishoda. Radi lakšeg posmatranja, eksperimenti vezani za ovaj fenomen se najčešće vrše u ulju.

Ponašanje naelektrisanih kapi je interesantno zbog raznih primena u tehnologiji. Primer su inkjet štampači gde se električno polje koristi da se formira i kontroliše snop kapi mastila koje su prethodno naelektrisane. Takođe, meteorologija se bavi ovom oblašću radi objašnjavanja određenih procesa pri formaciji oblaka i transferu

naelektrisanja kroz atmosferu (Blanchard 1958; Bhalawankar *et al.* 2004).

Ovaj rad se bavi uticajem provodnosti vode na fenomen nesjedinjavanja kapi vode. Provodnost je bitan faktor za ponašanje kapi jer je ovaj fenomen vođen razmenama naelektrisanja, a provodnost vode prvenstveno zavisi od supstanci koje su u njoj rastvorene. Cilj rada je da se na osnovu posmatranja fenomena ponudi objašnjenje za zavisnost ponašanja neelektrisanih kapi od provodnosti vode.

## Eksperiment

Za postizanje ovog fenomena mora se koristiti tečnost nezanemarljive provodnosti (npr. voda). Ukoliko se fenomen posmatra u vazduhu potrebne su veoma velike jačine električnog polja da bi se postiglo odbijanje, a takvo polje izaziva i druge pojave kao što je izobličenje kapljica koje otežavaju posmatranje procesa nesjedinjavanja. Zato se proces mora posmatrati u viskoznoj tečnosti koja je izolator, a u tu svrhu se uglavnom koristi ulje.

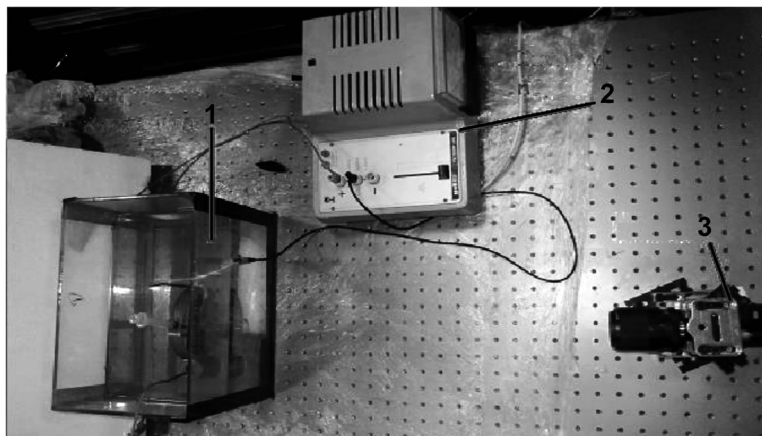
Na slici 1a je prikazana aparatura korišćena u eksperimentu koja se sastoji od izvora visokog napona, kamere i akvarijuma sa elektrodama. Na slici 1b je data skica dela aparature koji se nalazi u akvarijumu – elektrode.

Električno polje je uspostavljeno između dve pljosnate elektrode (slika 1b) i može se smatrati da je homogeno u prostoru između elektroda. Elektrode su povezane na izvor visokog napona koji se može podešavati. Gornja elektroda ima mali otvor kroz koji se ubacuju kapljice. Kapljice se formiraju pomoću fiksiranog šprica sa tankom iglom. Ovom metodom se dobijaju kapi pri-

---

*Milan Krstajić (1994), Beograd, Đerdapska 3, učenik 4. razreda Matematičke gimnazije u Beogradu*

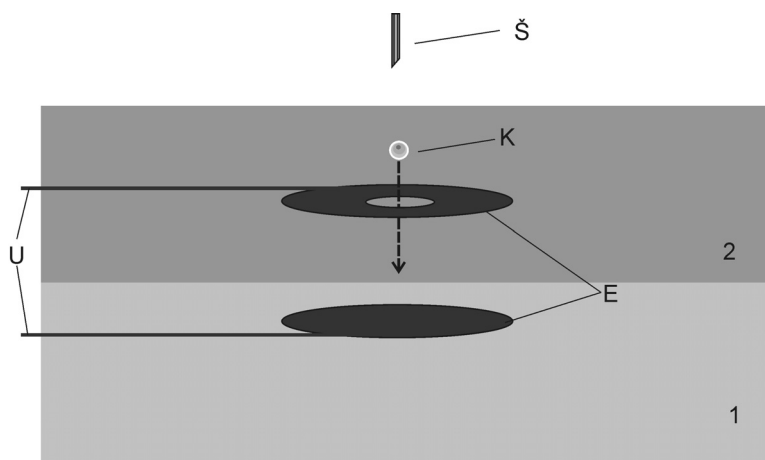
*MENTOR: Vladan Pavlović, PMF, Univerzitet u Nišu*



Slika 1a. Aparatura:  
1 – akvarijum sa elektrodama,  
2 – izvor visokog napona,  
3 – kamera.

Figure 1a. Experimental setup:

1 – Water tank with electrodes,  
2 – high voltage source,  
3 – camera.



Slika 1b. Položaj elektroda u akvarijumu:  
K – kapljica vode,  
E – elektrode,  
U – ka izvoru visokog napona,  
Š – špric;  
1 – voda, 2 – ulje.

Figure 1b. Position of electrodes within the tank:

K – water droplet,  
E – electrodes,  
U – leads connected to the voltage source,  
Š – syringe;  
1 – water, 2 – oil.

bližno istog poluprečnika (probnim merenjima je utvrđeno da poluprečnik varira u opsegu  $\pm 2\%$ ). Kretanje kapljica između elektroda je snimano sa high-speed kamerom (60 fps). S obzirom da je ulje veoma viskozni fluid, kapi gotovo trenutno postižu terminalnu brzinu kretanja. Tada se na osnovu Stoksovog zakona viskoznosti može uspostaviti veza između naelektrisanja kapi  $Q$  i njene terminalne brzine  $v$ :

$$Q = \frac{\pi r \cdot (9\eta v - 2(\rho_v - \rho_u)r^2 g)}{3E} \quad (1)$$

gde je  $r$  – poluprečnik kapi,  $\eta$  – koeficijent viskoznosti ulja,  $v$  – terminalna brzina kapi,  $\rho_v$  – gustina vode,  $\rho_u$  – gustina ulja;  $g$  – gravitaciono ubrzanje,  $E$  – jačina električnog polja.

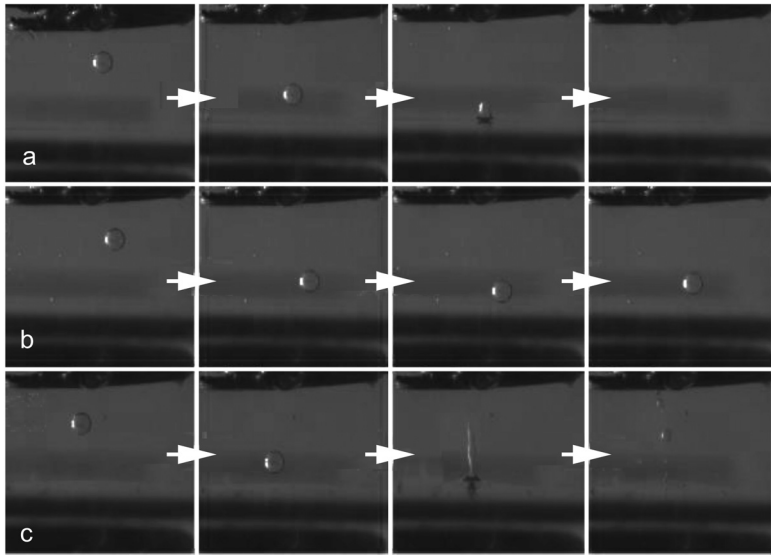
Ponašanje kapljica u zavisnosti od primenjenog napona je snimano za različite vrednosti

električne provodnosti vode. Provodnost vode je varirana rastvaranjem NaCl. Gustina ulja korišćenog u eksperimentu je  $909 \text{ kg/m}^3$ . Koeficijent viskoznosti ulja je  $0.0491 \text{ kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$ . Električno polje  $E$  je računato po formuli:

$$E = \frac{U}{d}$$

gde je  $U$  – napon između elektroda (napon na izvoru), a  $d$  – rastojanje između elektroda ( $d = 11.25 \text{ mm}$ ).

Brzine kapljica su određivane sa dobijenih snimaka na osnovu vremenske razlike i pomeraja kapi na dva različita frejma. Pomeraj kapi je meren u pixelima i upoređivan sa referentnom udaljenošću na snimku. Za referentnu udaljenost je uzeta razdaljina između elektroda.



Slika 2.  
 a – sjedinjavanje kapljice sa površinom vode,  
 b – odbijanje kapljice o površinu vode,  
 c – dezintegracija kapljice pri kontaktu sa površinom vode.

Figure 2.  
 a – coalescence of droplet with water surface,  
 b – droplet bouncing of the surface,  
 c – droplet being ripped apart after the contact with the surface.

## Rezultati i diskusija

U zavisnosti od napona na elektrodama, dobijena su tri različita vida ponašanja kapljica: sjedinjavanje, nesjedinjavanje i kidanje (slika 2).

Sjedinjavanje se ostvaruje za vrednosti polja koje su manje od neke granične vrednosti,  $E_n$ . Pri vrednostima većim od  $E_k$  (pritom je  $E_k > E_n$ ) dolazi do kidanja kapljica, a do odbijanja dolazi kada je vrednost polja u intervalu od  $E_n$  do  $E_k$ . Za vrlo male vrednosti polja se može dogoditi da se kap zaustavi na samoj površini i miruje na tankom sloju ulja, ali ta pojava nije elektrostatičke prirode. Naime, može se desiti da se između kapi i površine vode formira jako tanak sloj ulja koji drže sile površinskog napona. Taj sloj će zaustaviti kapljicu ukoliko je njena kinetička energija dovoljno mala.

Električna provodnost ima značajnu ulogu u dva podprocesa tokom ovog fenomena, kod naelektrisanja kapljice pri dodiru sa gornjom elektrodom odmah po ubacivanju kapljice i kod odbijanja kapljice o površinu vode. To je zato što su oba procesa praćena razmenama naelektrisanja. Sila  $F$  kojom električno polje deluje na kapljicu je:

$$F = qE$$

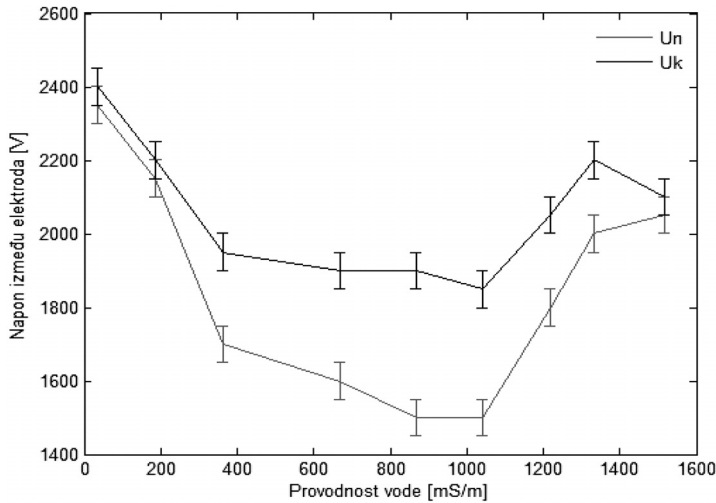
gde je  $q$  – naelektrisanje kapljice, a  $E$  – jačina električnog polja.

Iz poslednje formule se vidi da od količine primljenog početnog naelektrisanja zavisi ubrzanje kapljice, a samim tim i brzina koju kapljica dostigne do kontakta sa površinom. Onda je jasno da ta količina naelektrisanja utiče i na ishod kontakta kapi i površine.

Sam proces naelektrisanja počinje privlačenjem kapi od strane elektrode pod uticajem dielektrforetičkih sila – polje u oblasti otvora na prvoj elektrodi je nehomogeno pa samim tim deluje na kapljicu jer je voda dielektrik. Kada se ostvari kontakt elektrode i kapi dolazi do električne struje u smeru električnog polja. Zbog naelektrisanja koje je kap primila dolazi do odbijanja kapi i elektrode. Na taj način kap počinje da se kreće ka površini vode. Pri istoj postavci aparature dobijaju se kapi približno istog naelektrisanja što je zaključeno na osnovu postojanja jedinstvenih graničnih vrednosti napona za svaki set eksperimentalnih parametara.

Primećeno je da za svaku vrednost električne provodnosti vode postoje granični naponi nesjedinjavanja i kidanja. Zavisnosti tih graničnih napona su date na slici 3.

Pri kontaktu kapi i površine formira se tzv. „vodeni most” (odnosno dolazi do spajanja površine vode sa kapljicom u uskom području oko tačke kontakta) kroz koji dolazi do razmene naelektrisanja između kapi i površine. Ovo rezultira promenom znaka naelektrisanja kapi, odnosno promenom smera sile kojom električno



Slika 3. Zavisnost graničnih napona nesjedinjavanja ( $U_n$ ) i kidanja ( $U_k$ ) od električne provodnosti vode

Figure 3. Dependence of critical voltages for non-coalescence ( $U_n$ ) and drop ripping ( $U_k$ ) on the electrical conductivity of water

polje deluje na kap. Ukoliko je proces razmene naelektrisanja dovoljno brz kap će se odbiti od površine. To se jasno vidi iz geometrije „vodenog mosta”: kap će se sjediniti sa ostatkom vode ukoliko priđe dovoljno blizu površini i pritisak unutar „mosta” usled zakrivljenosti površine vode postane manji od pritiska unutar kapi; to se neće dogoditi ukoliko električno polje odbije kap u dovoljno malom vremenskom intervalu. Tokom kontakta na kap deluje i sila površinskog napona koja vuče kap ka površini i potiče od „vodenog mosta”. Ukoliko se kap nije sjedinila sa površinom onda pritisak unutar „vodenog mosta” ni u jednom trenutku nije bio manji od pritiska unutar kapi pa nije bilo protoka vode kroz vodeni most, odnosno zapremina kapi koja se odbila je ostala nepromenjena.

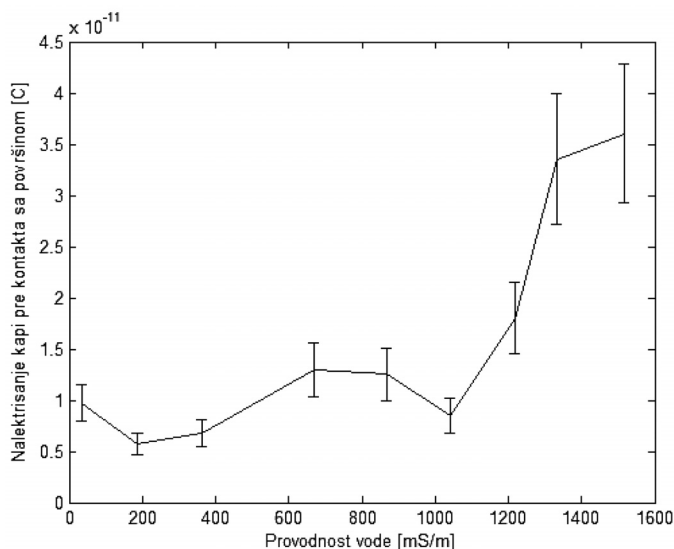
Na graficima, na slikama 4 i 5, prikazane su vrednosti naelektrisanja kapi pre i posle kontakta sa površinom vode pri graničnom naponu nesjedinjavanja izračunate po formuli (1) na osnovu brzina kretanja kapi.

Da bi se kap odbila od površine vode potrebno je da pod dejstvom električne sile dobije brzinu usmerenu ka gore pre nego što se isuviše približi površini. Razumno je očekivati da će granični napon nesjedinjavanja opadati sa povećanjem provodnosti vode jer je moguća brža razmena naelektrisanja pri kontaktu sa površinom i samim tim se ranije javlja električna sila usmerena ka gore. Ipak, na grafiku zavisnosti graničnog napona nesjedinjavanja postoje dve oblasti: dok je provodnost vode manja od  $\approx 1$  m/s

vrednost graničnog napona opada, a posle toga raste. Moguće objašnjenje je da kap, pri velikim vrednostima provodnosti, usled jakog privlačenja gornje elektrode na početku kretanja primi veliku količinu naelektrisanja, čemu u prilog govore vrednosti naelektrisanja date na grafiku na slici 4. Kako je električna sila tokom padanja u tom slučaju velika, to rezultuje većom kinetičkom energijom pri kontaktu sa površinom. Kada dođe do razmene naelektrisanja, električna sila (koja je tada usmerena na gore) pored ostalih sila mora da savlada i inerciju kapi što daje veći granični napon. Da bi se pratili pomenuti procesi merene su količine naelektrisanja pre i posle kontakta sa površinom vode (slike 4 i 5).

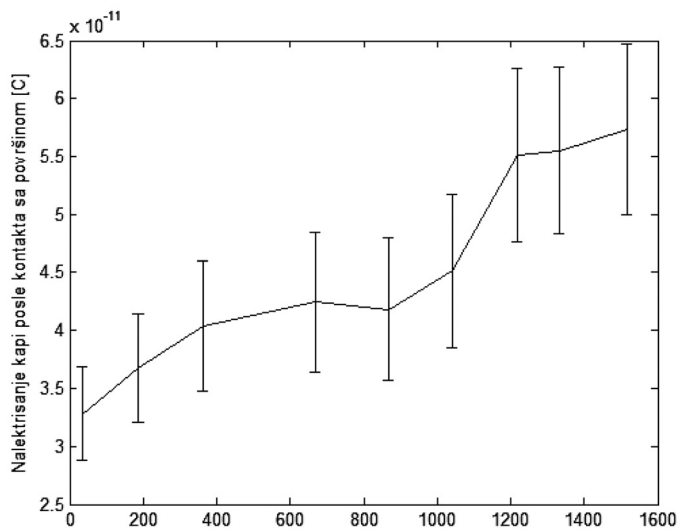
Oblik zavisnosti naelektrisanja kapi posle kontakta je očekivan. S obzirom da je sila površinskog napona u „vodenom mostu” koja zadržava kap približno konstantna, a početna kinetička energija kapi pri kontaktu raste sa porastom provodnosti, logično je da naelektrisanje potrebno za otkidanje raste sa provodnošću usled veće inercije kapi. Pojava kidanja kapi pri visokim naponima se dešava usled neravnomernog raspoređivanja naelektrisanja na kapi. Naime, kada dođe do kontakta kapi i površine, naelektrisanje koje se prenese na kapljicu se ne raspoređuje ravnomerno, već se akumulira na vrhu kapljice jer ga tamo vuče električno polje.

Što je električno polje veće to je raspodela naelektrisanja neravnomernija. To dovodi do mehaničkog napona na kapi koji je razbija na manje kapi.



Slika 4. Zavisnost naelektrisanja kapljice pre kontakta sa površinom vode pri graničnom naponu nesjedinjavanja

Figure 4. Dependence of the droplet charge before contact with the water surface on the electrical conductivity of water at the critical voltage for non-coalescence



Slika 5. Zavisnost naelektrisanja kapljice posle kontakta sa površinom vode pri graničnom naponu nesjedinjavanja

Figure 5. Dependence of the droplet charge after contact with the surface on the electrical conductivity of water at the critical voltage for non-coalescence

Ovaj eksperiment je omogućio objašnjavaње ovog fenomena samo na opisnom nivou. Uz pomoć kamere veće rezolucije i brzine snimanja bilo bi moguće još bolje objasniti ovaj fenomen jer bi u tom slučaju mogao biti snimljen sam kontakt kapi i površine. Tada bi procesi razmene naelektrisanja mogli biti kvantitativno opisani i uticaj provodnosti vode bi mogao biti neposrednije objašnjen. Takođe, više informacija o dinamici samog kontakta koje bi bilo moguće dobiti bi doprinelo još preciznijem opisu fenomena.

## Zaključak

Eksperiment je pokazao kako električna provodnost utiče na odvijanje fenomena nesjedinjavanja kapi. Rezultat merenja je dao delimično neočekivan oblik zavisnosti graničnog napona od provodnosti. Obradom podataka je ustanovljeno kako se naelektrisanje kapljice menja kroz eksperiment što je doprinelo konstrukciji potencijalnog objašnjenja za ponašanje kapljice. Takođe, uočen je fenomen kidanja kapljica koji nije bio pomenut u literaturi, a značajno utiče na nesjedinjavanje.

## Literatura

Ristenpart W. D., Bird J. C., Belmonte A., Dollar F., Stone H. A. 2009. Non-coalescence of oppositely charged drops. *Nature*, **461**: 377.

Blanchard D. C. 1958. Electrically charged drops from bubbles in sea water and their meteorological significance. *Journal of the Atmospheric Sciences (Journal of Meteorology)*, **15**: 383.

Bhalawankar, Sathe A. B., Kamra A. K.. 2004. The evaporation of the charged and uncharged water drops suspended in a wind tunnel. *Journal of Earth System Science*, **113** (2): 129.

---

Milan Krstajić

### Influence of Electrical Conductivity of Water on Non-coalescence of Charged Drops

The droplet non-coalescence phenomenon may arise when two aquatic boundary surfaces are brought to contact. It is characteristic to charged droplets of water in electric field. In usual circumstances a droplet which reaches another water entity would just merge with it. But if the droplet carries electrical charge and there is a sufficiently strong electric field present, the droplet may bounce of the surface instead. This process is governed by the exchange of the electrical charge between the droplet and the water surface. Hence, it is expected for the electrical conductivity of water, which depends on the presence of ionic solutes, to have an impact on this phenomenon. The goal of this experiment was to investigate the extent to which the non-coalescence phenomenon is influenced by the electrical conductivity of water.

The experiment was performed by letting water droplets into the space between two planar electrodes positioned in such a way so the top electrode lies in oil, the bottom electrode lies in water and there is an oil-water boundary parallel to the electrodes (Figure 2b). Oil was used in order to reduce the speed at which the droplets

make contact with the water surface, and lower down the critical voltage for non-coalescence into an observable range. The conductivity of water was regulated by dissolving appropriate quantities of NaCl.

It was observed that there are three different possible outcomes. At low voltages, the droplet merges with the water surface. At voltages above a certain critical value, it bounces of the surface. And at voltages higher than a second critical value disintegrates upon contact with the surface (Figure 3, cases a, b and c respectively). The graph in Figure 3 shows the dependence of these voltages on the conductivity of water.

The complete process of droplet non-coalescence contains several steps. First the neutral droplet which has been introduced into the system is slowly attracted by the upper electrode through dielectric interactions. The droplet then acquires electrical charge which makes the droplet to start moving along the direction of the electric field. When the droplet makes contact with the water surface, another exchange of charge happens. This causes the final charge of the droplet to be of the opposite sign with respect to the charge prior to the contact. Thus, the electrostatic force now forces the droplet away from the water surface which results in the droplet bouncing from the surface. The final step happens only if the charge exchange is sufficiently fast to reverse the motion of the droplet before it approaches the water surface enough to coalesce. Hence the conductivity influences the phenomenon in two ways as it can be inferred from the dependency of the droplet charges before and after the contact with the surface (Figures 4 and 5 respectively). Firstly, the charge which droplet acquires at the beginning is larger as the conductivity becomes larger. This results in the droplet having a greater kinetic energy at the moment of contact with the surface. Secondly, the charge redistribution at the moment of contact is faster for greater water conductivities which results in the motion of the droplet being reversed faster. For lower conductivities the second charge exchange has dominant effect which results in the fall of the critical voltage for non-coalescence with the conductivity. As the conductivity is increased further the effect of the increasing kinetic energy before contact

becomes predominant and the value of the critical voltage rises again.

The experiment has shown that the influence of the electrical conductivity of water on the droplet non-coalescence phenomenon is very notable. It is the case since some of the crucial steps in the phenomenon are governed by charge exchanges and more specifically the rate at which those exchanges happen. 