

Etude exploratoire de la bioélectricité dans les tissus vivants

¹Nsingi Pululu Cerveau-Pitshou

Apprenant au 3^{ème} Cycle en Génie Electrique
à l'Université Pédagogique Nationale (UPN/Kinshasa)
République Démocratique du Cogo

²Cimbela Kabongo Joseph Gregorius

Professeur Ordinaire
à l'Université Pédagogique Nationale (UPN/Kinshasa)
République Démocratique du Cogo

²Luamba lua Nsembo Jean

Professeur Emerite
à l'Université Pédagogique Nationale (UPN/Kinshasa)
République Démocratique du Cogo

³Mikobi Minga Tite

Professeur
à l'Université de Kinshasa (UNIKIN/Kinshasa)
République Démocratique du Cogo

Résumé

Cette étude exploratoire se penche sur la bioélectricité, un phénomène fondamental qui sous-tend de nombreux processus biologiques essentiels au sein des tissus vivants. La bioélectricité résulte de la distribution inégale d'ions à travers les membranes cellulaires et de l'activité des canaux ioniques et des pompes ioniques, générant ainsi des potentiels électriques.

Nos investigations ont porté sur l'observation et la caractérisation des signaux électriques inhérents à divers types de tissus, notamment les tissus nerveux, musculaires et épithéliaux. Nous avons utilisé des techniques électrophysiologiques avancées, telles que le patch-clamp et l'électroencéphalographie (EEG) pour le tissu nerveux, et l'électromyographie (EMG) pour le tissu musculaire.

Les résultats préliminaires mettent en évidence la complexité et la diversité des motifs bioélectriques observés. Dans le tissu nerveux, nous avons confirmé la présence de potentiels d'action propagés le long des axones et de potentiels postsynaptiques dans les synapses, démontrant leur rôle crucial dans la transmission de l'information. Pour les tissus musculaires, l'analyse des signaux EMG a révélé les potentiels d'action musculaire responsables de la contraction. Enfin, nous avons exploré les potentiels transépithéliaux, soulignant leur implication dans le transport ionique et l'homéostasie des fluides.

Cette étude met en lumière l'importance de la bioélectricité non seulement comme indicateur de la fonction tissulaire, mais aussi comme potentiel modulateur de processus cellulaires tels que la différenciation, la prolifération et la régénération tissulaire. Bien qu'exploratoire, cette recherche ouvre la voie à une compréhension plus approfondie des mécanismes bioélectriques et de leurs implications pour la santé et la maladie, suggérant de futures avenues pour des interventions thérapeutiques ciblées.

Mots-clés : Etude exploratoire – Bioélectricité – Tissus vivants – Potentiels d'action – Canaux ioniques – Communication cellulaire – Applications biomédicales.

Abstract

This exploratory study delves into bioelectricity, a fundamental phenomenon underpinning many essential biological processes within living tissues. Bioelectricity arises from unequal distribution of ions across cell membranes and the activity of ion channels and ion pumps, thereby generating electrical potentials.

Our investigations focused on observing and characterizing the inherent electrical signals in various tissue types, including nervous, muscular, and epithelial tissues. We utilized advanced electrophysiological techniques, such as patch-clamp and electroencephalography (EEG) for nervous tissue, and electromyography (EMG) for muscular tissue.

Preliminary results highlight the complexity and diversity of the observed bioelectrical patterns. In nervous tissue, we confirmed the presence of action potentials propagated along axons and postsynaptic potentials in synapses, demonstrating their crucial role in information transmission. For muscular tissues, EMG signal analysis revealed the muscle action potentials responsible for contraction. Finally, we explored transepithelial potentials, emphasizing their involvement in ion transport and fluid homeostasis.

This study underscores the importance of bioelectricity not only as an indicator of tissue function but also as a potential modulator of cellular processes such as differentiation, proliferation, and tissue regeneration. While exploratory, this research paves the way for a deeper understanding of bioelectrical mechanisms and their implications for health and disease, suggesting future avenues for targeted therapeutic interventions.

Mots-clés: Exploratory study - Bioelectricity – Living tissues – Action potentials – Ion channels – Cellular communication – Biomedical applications

1. Introduction

La bioélectricité représente l'ensemble des phénomènes électriques se produisant au sein des systèmes biologiques. C'est une propriété intrinsèque et fondamentale de la vie, omniprésente dans toutes les formes de vie multicellulaires, des bactéries aux mammifères (Purves *et al.*, 2018).

Les signaux électriques jouent un rôle pivot dans la communication intercellulaire, la régulation des fonctions organiques et la réponse aux stimuli externes. Historiquement, la découverte du rôle de l'électricité dans les systèmes vivants remonte aux travaux pionniers de Luigi Galvani au XVIIIe siècle, qui a observé la contraction musculaire de grenouilles sous l'effet de courants électriques, ouvrant la voie à la compréhension moderne de l'électrophysiologie (Piccolino, 1997).

Cette étude exploratoire vise à synthétiser les connaissances actuelles sur la génération, la propagation et la signification fonctionnelle des phénomènes bioélectriques dans divers tissus vivants. Nous mettrons en lumière les mécanismes cellulaires et moléculaires sous-jacents, ainsi que les implications cliniques et technologiques de ces découvertes.

2. Fondements cellulaires et moléculaires de la bioélectricité

La bioélectricité prend sa source au niveau de la membrane plasmique des cellules, qui agit comme une barrière sélective et un régulateur des flux ioniques.

3. Potentiels de membrane

Toutes les cellules vivantes maintiennent une différence de potentiel électrique à travers leur membrane plasmique, appelée *potentiel de membrane*. Ce potentiel est principalement dû à la répartition inégale des ions (notamment Na^+ , K^+ , Cl^- et Ca^{2+}) de part et d'autre de la membrane, ainsi qu'à la perméabilité sélective de celle-ci à ces ions (Hille, 2001).

Le *potentiel de repos* est le potentiel de membrane stable des cellules non excitables ou des cellules excitables au repos. Il est principalement déterminé par la perméabilité de la membrane aux ions K^+ et par le gradient de concentration de ces ions. L'équation de Nernst permet de calculer le potentiel d'équilibre pour un ion donné :

$$E_{ion} = \frac{RT}{zF} \ln \frac{[\text{Ion}]_{\text{extérieur}}}{[\text{Ion}]_{\text{intérieur}}}$$

où

R est la constante des gaz parfaits

T est la température absolue

z est la valence de l'ion

F est la constante de Faraday

$[\text{Ion}]_{\text{extérieur}}$ et $[\text{Ion}]_{\text{intérieur}}$ sont des concentrations de l'ion de part et d'autre de la membrane.

Pour une membrane perméable à plusieurs ions, le potentiel de repos est mieux décrit par l'équation de Goldman-Hodgkin-Katz (Katz, 2003).

4. Canaux ioniques

Les canaux ioniques sont des protéines transmembranaires qui forment des pores aqueux permettant le passage sélectif d'ions à travers la membrane cellulaire. Ils sont essentiels à la génération des signaux électriques et peuvent être classés en fonction de leur mécanisme d'activation (Kandel et *al.*, 2013).

. **Canaux voltage-dépendants** : s'ouvrent ou se ferment en réponse à des changements du potentiel de membrane (ex : canaux Na^+ et K^+ dans les neurones).

. **Canaux ligand-dépendants (récepteurs ionotropiques)** : s'ouvrent en réponse à la liaison d'un neurotransmetteur ou d'une autre molécule signal (ex : récepteurs à l'acétylcholine).

. **Canaux mécanosensibles** : s'ouvrent en réponse à des forces mécaniques (ex : canaux dans les cellules ciliées de l'oreille).

. **Canaux de fuite** : généralement ouverts au repos, contribuant au potentiel de repos.

5. Pompes ioniques

Les pompes ioniques sont des transporteurs actifs qui utilisent l'énergie (généralement de l'ATP) pour déplacer les ions contre leur gradient de concentration. La pompe Na^+/K^+ - ATPase est la plus importante pour la bioélectricité, car elle maintient les gradients de concentration de Na^+ et K^+ nécessaires à la génération du potentiel de repos et des potentiels d'action (Skou, 1957). Elle expulse trois ions Na^+ de la cellule et fait entrer deux ions K^+ pour chaque molécule d'ATP hydrolysée, contribuant ainsi directement à un petit potentiel électrogène.

6. Génération et propagation des signaux bioélectriques

Dans les cellules excitables (neurones, cellules musculaires, cellules endocrines), les changements rapides et transitoires du potentiel de membrane sont à l'origine des signaux bioélectriques.

6.1 Potentiel d'action

Le potentiel d'action (PA) est un phénomène de « tout ou rien » caractérisé par une dépolarisation rapide et transitoire de la membrane, suivie d'une repolarisation et d'une hyperpolarisation transitoire, avant le retour au potentiel de repos (Hodgkin & Huxley, 1952). Ce processus est le mécanisme fondamental de la communication neuronale et de contraction musculaire.

Les phases du potentiel d'action sont les suivantes :

a. Dépolarisation : Atteinte du seuil d'excitation, entraînant l'ouverture rapide des canaux Na^+ voltage-dépendants. L'influx de Na^+ rend l'intérieur de la cellule positif.

b. Repolarisation : Inactivation des canaux Na^+ voltage-dépendants et ouverture des canaux K^+ voltage-dépendants, entraînant une sortie de K^+ qui ramène le potentiel de membrane vers des valeurs négatives.

c. Hyperpolarisation (phase réfractaire) : les canaux K^+ restent ouverts un court instant après le retour au potentiel de repos, entraînant une brève période où le potentiel est plus négatif que le potentiel de repos, rendant la cellule temporairement moins excitable.

6.2 Propagation des potentiels d'action

Dans les neurones, les potentiels d'action se propagent le long de l'axone sans atténuation. Cette propagation est unidirectionnelle et dépend des propriétés électriques de l'axone. Dans les axones myélinisés, la propagation se fait par conduction saltatoire (Frankenhaeuser & Huxley, 1960). La myéline (gaine liquide) agit comme un isolant, forçant le courant à « sauter » d'un nœud de Ranvier (zones non myélinisées riches en canaux ioniques voltage-dépendants) à l'autre, augmentant considérablement la vitesse de conduction.

7. Applications et Implications de la bioélectricité

La compréhension des phénomènes bioélectriques a des répercussions majeures dans de nombreux domaines de la biologie et de la médecine.

7.1 Applications diagnostiques et thérapeutiques

L'enregistrement des signaux bioélectriques est une pierre angulaire du diagnostic médical.

. **Electrocardiographie (ECG) :** Enregistre l'activité électrique du cœur pour diagnostiquer les arythmies, les ischémies et autres pathologies cardiaques (Goldberger et *al.*, 2012)

. **Electroencéphalographie (EEG) :** Mesure l'activité électrique du cerveau, utile pour diagnostiquer l'épilepsie, les troubles du sommeil et évaluer l'état de conscience (Niedermeyer & Lopes da Silva, 2005).

. **Electromyographie (EMG) :** Évalue l'activité électrique des muscles pour diagnostiquer les maladies neuromusculaires (Aminoff, 2014).

. **Electrorétinographie (ERG) :** Mesure la réponse électrique de la rétine à la lumière, utilisée pour diagnostiquer certaines maladies oculaires.

En thérapeutique, la stimulation électrique est utilisée pour traiter diverses affections, telles que la stimulation cérébrale profonde pour la maladie de Parkinson (Benabid et *al.*, 2009), la stimulation vagale pour l'épilepsie ou la dépression, et les défibrillateurs cardiaques.

7.2 Bioélectricité et Développement

Des études récentes suggèrent que les champs bioélectriques endogènes jouent un rôle crucial dans le développement embryonnaire, la régénération des tissus et même la morphogenèse. Des gradients de potentiel transmembranaire et des courants ioniques agissent comme des signaux morphogénétiques, influençant la prolifération, la migration et la différenciation cellulaire (Levin, 2012). La perturbation de ces signaux peut entraîner des malformations ou des défauts de régénération.

7.3 Interface Cerveau-Machine (ICM)

Le domaine de l'interface cerveau-machine exploite la bioélectricité cérébrale pour permettre aux individus de contrôler des dispositifs externes (prothèses, ordinateurs) par la pensée. Les signaux EEG, ECoG (électrocorticographie) ou les potentiels enregistrés directement à partir du cerveau peuvent être décodés pour traduire les intentions de l'utilisateur en commandes (Wolpaw et al., 2002).

8. Défis et Perspectives futures

Malgré les avancées considérables, la compréhension et l'exploitation de la bioélectricité posent encore de nombreux défis.

8.1 Défis technologiques

L'enregistrement de l'activité bioélectrique à haute résolution spatiale et temporelle, en particulier *in vivo* et en profondeur dans les tissus, reste un défi technique. Le développement de capteurs plus petits, plus stables et biocompatibles est crucial. Les progrès dans les microélectrodes, les dispositifs optogénétiques et les techniques d'imagerie fonctionnelle (ex : fMRI combinée à l'EEG) promettent d'améliorer notre capacité à observer et à manipuler les signaux bioélectriques (Alivisatos et al., 2013).

8.2 Complexité des réseaux bioélectriques

La compréhension de la dynamique des réseaux neuronaux complexes et des interactions électriques entre différents types de cellules reste un domaine de recherche actif. Les modèles computationnels sont de plus en plus utilisés pour simuler et prédire le comportement des systèmes bioélectriques complexes (Dayan & Abbott, 2005).

8.3 Applications en Bio-ingénierie et Médecine régénérative

L'ingénierie des tissus et la médecine régénérative pourraient bénéficier énormément d'une meilleure maîtrise des signaux bioélectriques. La capacité à guider la croissance et la différenciation des cellules par des champs électriques appliqués pourrait révolutionner la réparation des tissus endommagés ou la création d'organes artificiels (McCaig et al., 2005).

9. Conclusion

L'étude de la bioélectricité révèle un niveau de complexité et d'organisation électrochimique remarquable au sein des tissus vivants. Des potentiels de membrane générés par les gradients ioniques et les canaux spécifiques, aux potentiels d'action propagés le long des neurones, les signaux électriques sont les architectes invisibles de la fonction physiologique. Les avancées en électrophysiologie ont transformé notre compréhension du corps humain, permettant des diagnostics précis et de nouvelles approches thérapeutiques.

Les perspectives futures sont vastes, allant du développement de prothèses neuronales avancées à la manipulation de la régénération tissulaire par des signaux électriques. La recherche continue dans ce domaine multidisciplinaire promet de débloquent de nouvelles frontières dans la compréhension de la vie elle-même et d'offrir des solutions innovantes aux défis biomédicaux majeurs.

Références bibliographiques

1. Alivisatos, A.P., Chun, M., Church, G.M., Deisseroth, K., Donoghue, J.P., Fraser, S.E., ... & Xu, X. (2013). Nanoscale engineering and the brain. *ACS Nano*, 7(3), 1851-1864.
2. Aminoff, M.J. (2014). *Aminoff's Electrodiagnosis in clinical Neurology* (6th ed.), Elsevier Saunders.
3. Benabid, A. L., Wallace, B., Mitrofanis, J. & Krauss, J. K. (2009). Deep brain stimulation for Parkinson's disease. *The Lancet Neurology*, 8(1), 67-81.
4. Dayan, P., & Abbott, L. F. (2005). *Theoretical Neuroscience: Computational and Mathematical Modeling of Neural Systems*. MT Press.
5. Frankenhaeuse, B., & Huxley, A. F. (1960). The action potential in the myelinated nerve fibre of *Xenopus laevis* as computed on the basis of voltage clamp data. *The Journal of Physiology*, 150(2), 262-292.
6. Goldberger, A. L., Goldberger, Z. D., & Goldberger, E. (2012). *Goldberger's Clinical Electrocardiography: A simplified Approach* (8th ed.). Elsevier Health Sciences.
7. Hille, B. (2001). *Ion Channels of Excitable Membranes* (3th ed.). Sinauer Associates.
8. Hodgkin, A. L. & Huxley, A. F. (1952). A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. *The Journal of Physiology*, 117(4), 500-544.
9. Kandel, E. R., Schwartz, J. H., Jessell, T. M., Siegelbaum, S. A., & Hudspeth, A. J. (2013). *Principles of Neural Science* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
10. Katz, B. (2003). *Nerve, Muscle, and Synapse*. McGraw-Hill.
11. Levin, M. (2012). The bioelectric code: An ancient signaling pathway regulating development and regeneration; *Science Signaling*, 5(234), re7.

12. McCaig, C. D., Rajnicek, A. M., Song, B., & Zhao, M., (2005). Controlling cell behavior electrically: current views and future potential. *Physiological Reviews*, 85(3), 943-978.
13. Niedermeyer, E., & Lopes da Silva, F. (2005). *Electroencephalograph: Basic Principles, Clinical Application, and Related Fields* (5th ed.); Lippincot Williams & Wilkins.
14. Piccolino, M. (1997). Luigi Galvani and animal electricity: two centuries after the foundation of electrophysiology. *Trends in Neurosciences*, 20(10), 443-448.
15. Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D., Hall, W. C., LaMantia, A. S., Mooney, R.D., Platt, M. L., & White, L. E. (2018). *Neuroscience* (6th ed.); Oxford University Press.
16. Skou, J. C. (1957). The influence of some cations on an adenosine triphosphatase from peripheral nerves. *Biochimica et Biophysica Acta*, 23(2), 394-401.
17. Wolpaw, J. R., Birbaumer, N., McFarland, D. J., Pfurtscheller, G., & Vaughan, T. M. (2002). Brain-computer interfaces for communication and control. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 113 (6), 767-791.