

Analogie du transport neuronal au transport électronique en nanotechnologie

I. Benaïssa *

Laboratoire de Traitement de Surface et Elaboration de Matériaux,
Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf, 'USTO'
B.P. 1505, El M'Naouer, Oran, Algérie

(reçu le 25 Janvier 2009 – accepté 21 Mars 2009)

Résumé - *Le système nerveux est formé de deux types de cellules: les cellules gliales et les neurones. Les astrocytes, comme la plupart des cellules gliales, ont longtemps été considérés essentiellement pour leur rôle de support et d'entretien du tissu nerveux. Mais, de plus en plus d'évidences plaident en faveur d'une implication beaucoup plus importante des astrocytes dans la communication nerveuse. Les astrocytes sont couplés les uns aux autres par des 'gap-jonctions' à travers lesquels peuvent circuler divers métabolites. C'est par ces jonctions que les astrocytes évacuent vers les capillaires, le potassium extracellulaire excédentaire généré par une intense activité neuronale. A travers ce réseau d'astrocytes se propagerait par exemple, des vagues d'ions calcium dont l'effet régulateur pourrait se faire sentir dans un grand nombre de synapses en même temps. Les prolongements astrocytaires qui entourent les synapses pourraient ainsi exercer un contrôle plus global sur la concentration ionique et le volume aqueux dans les fentes synaptiques. Le réseau astrocytaire constituerait donc un système de transmission non-synaptique qui se superposerait au système neuronal pour jouer un rôle majeur de modulation des activités neuronales. A cet effet, et dans l'espoir d'éclairer les neurochirurgiens et les spécialistes qui s'intéressent aux transplantations et à une meilleure maîtrise du transport et fonctionnement de l'influx nerveux. Le présent travail apporte une approche entre le transport et les propriétés électroniques d'une jonction miniature, une 'microjonction', dont la nanotechnologie ne saurait se passer, l'usage de jonctions P-N, un semi-conducteur dopé P (ions positifs) et un dopé N (ions négatifs), est très utilisé pour tous les dispositifs de type diode car ne laissant passer le courant que dans un sens, ce genre de jonction fait aussi apparaître des propriétés optiques intéressantes.*

Abstract – *The nervous system is made of two types of cells: the gliades cells and neurons. The astrocytes, as the majority of the gliades cells, were considered a long time primarily for their role of support and preservation of nervous fabric. But obviously there are more and more reasons in favour of a much more important implication of the astrocytes in the nervous communication. The astrocytes are coupled the ones with others by 'gap-junctions' through which can circulate various metabolites. It is by these junctions that the astrocytes evacuate towards the capillaries extra cellular potassium excess generated by an intense neuronal activity. Through this astrocytes network would be propagated for example calcium ions waves of which regulating effect could be felt in a great numbers of synapses at the same time. The astrocytes prolongations which surround the synapses could thus exert a more total control of the ionic concentration and aqueous volume in the synaptic slits. The astrocyte network would thus constitute a non-synaptic system of transmission which would be superimposed on the neuronal system to play an important role of modulation of the neuronal activities. For this purpose, and in the hope to light the neurosurgeons and the specialists who are interested in transplantations and a better control of transport and the specialist who are interested in transplantations and a better control of transport and operation of the nerve impulse, this*

* ib.benaïssa@laposte.net

work brings an approach between the transport and the electronic properties of a miniature junction, a 'microjunction', whose nanotechnology could not occur, the use of junction P-N, semiconductor doped P (positive ions) and one doped N (negative ions), is very much used for all the devices of the diode type because letting pass the current only in one direction: this kind of junction also reveals interesting optical properties.

Mots clés: Transport neuronal – Greffes de microcomposants – Transport et propriétés électroniques – Microjonction.

1. INTRODUCTION

Le système nerveux est formé de deux types de cellules: les cellules gliales et les neurones. Ce sont les neurones qui nous rendent si malins.

La puissance de notre cerveau lui vient de la formidable capacité d'intégration de son unité de base, le neurone. Chaque neurone reçoit en effet des influx nerveux de plusieurs milliers d'autres neurones. De ce fait, un des espoirs des neurologues est aujourd'hui d'atténuer les conséquences de diverses maladies dégénératives du cerveau en introduisant à l'intérieur de cet organe des cellules nerveuses aux capacités conservées [1].

Depuis plusieurs années, divers travaux ont montré que la greffe de cellules nerveuses permettait de diminuer, chez le rat, les séquelles provoquées par un accident vasculaire cérébral expérimental.

Au printemps 2000, Dr Wechsler et ses collègues de l'université de Pittsburgh créaient l'événement à San Diego au 52^{ième} Congrès de l'Académie Américaine de Neurologie. Pour la première fois, ces spécialistes décrivaient les résultats d'une greffe de cellules nerveuses chez douze malades victimes d'un accident vasculaire cérébral dans une partie profonde du cerveau et souffrant depuis, d'un important déficit moteur.

Les données définitives de ce travail viennent d'être publiées dans la revue internationale *Neuroly*. Des greffes sont d'ailleurs réalisées en petit nombre chez les patients atteints de la maladie de Parkinson [2, 3].

2. LES CELLULES GLIALES

On entend peu parler des cellules gliales. Pourtant, elles sont 10 à 50 fois plus nombreuses que nos 100 milliards de neurones! Leur faute impardonnable, C'est qu'elles ne conduisent pas l'influx nerveux. Mais cela ne les empêche pas pour autant d'être essentielles. Tellement que sans elles, les neurones ne fonctionneraient pas correctement.

Car les cellules gliales procurent aux neurones leur nourriture, les supportent et les protègent. Elles éliminent aussi les déchets causés par la mort neuronale et accélèrent la conduction nerveuse en agissant comme gaine isolante de certains axones. Différents types de cellules gliales assurent évidemment toutes ces fonctions.

Des noms différents sont donnés aux cellules gliales qui assument ces fonctions dans le système nerveux périphérique. On parle alors de cellules satellites pour le support mécanique des neurones et des cellules de Schwann pour la fabrication de la myéline [4]. Mais de toutes les cellules gliales, l'astrocyte est sans doute celui qui a les fonctions les plus complexes.

NEURONES, COMMUNICATION NEURONALE ET TRANSMISSION SYNAPTIQUE

Comme toutes les cellules de notre organisme, les neurones possèdent une membrane qui entoure un cytoplasme et un noyau qui contient les gènes. Ils ont tous aussi, les petits organites qui leur permettent de produire leur énergie et de fabriquer des protéines.

Mais comme le jeu préféré des neurones est de se transmettre de l'information. Ils possèdent deux types de prolongements bien particuliers qui les distinguent des autres cellules.

Les dendrites, qui se divisent comme les branches d'un arbre, recueillent l'information et l'acheminent vers le corps de la cellule.

Et l'axone, généralement très long et unique. Cet axone conduit l'information du corps cellulaire vers d'autres neurones avec qui il fait des connexions appelées synapses. Les axones peuvent aussi stimuler directement d'autres types de cellules, comme celles des muscles ou des glandes (Fig. 1).

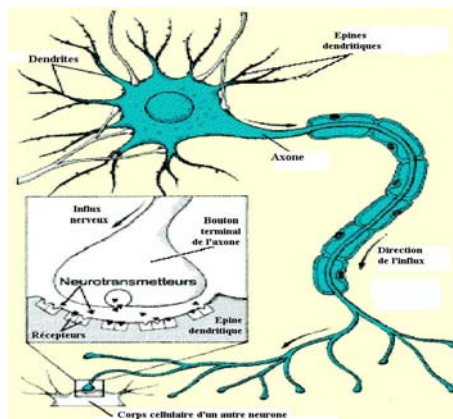


Fig. 1: Un neurone faisant et recevant des connexions d'autres neurones [5]

Le neurone est une cellule hautement spécialisée qui a accentué des caractéristiques de base des cellules [5], comme le fait d'avoir un potentiel trans-membranaire, de pouvoir prolonger son cytoplasme, etc. Ses prolongements se sont à leur tour spécialisés, de sorte que les canaux ioniques et les récepteurs de la membrane des dendrites sont différents de celle de l'axone.

De plus, chaque neurone est unique de par sa forme particulière, la position qu'il occupe dans le système nerveux et les connexions qu'il entretient avec d'autres neurones ou avec des cellules réceptrices (sensorielles) ou effectrices (musculaires ou glandulaires). Cette grande variabilité (il existe plus de 200 types différents de neurones) amène certains neurones à s'écarter du schéma classique de base.

Les neurones forment des réseaux à travers lesquels circule l'influx nerveux. Des dendrites jusqu'à l'extrémité parfois très éloignée de l'axone, c'est sous forme électrique que se propage cet influx à la surface de la membrane neuronale. Mais comme les neurones communiquent entre eux sans se toucher, ils utilisent des molécules spéciales appelées neurotransmetteurs pour faire passer l'influx nerveux d'un neurone à l'autre.

Cette transmission chimique de l'influx nerveux amène l'axone et les dendrites à développer des structures spécialisées pour la facilité. Les dendrites possèdent ainsi des milliers 'd'épines' qui bourgeonnent à leur surface. C'est vis-à-vis de ces épines que se situent les boutons terminaux des axones, sorte de renflements d'où sont excrétés les neurotransmetteurs. Mais ces structures qui constituent la synapse varient énormément de forme [6], tout comme la forme générale des neurones d'ailleurs (Fig. 2).

C'est grâce à la transmission synaptique que l'influx électrique peut passer d'un neurone à l'autre. Ce passage est assuré par des molécules chimiques, les neurotransmetteurs qui se fixent sur des récepteurs. En variant la quantité des neurotransmetteurs émis, de récepteurs disponibles, ou encore de l'affinité entre les deux, nos synapses se modifient constamment pour nous permettre d'apprendre.

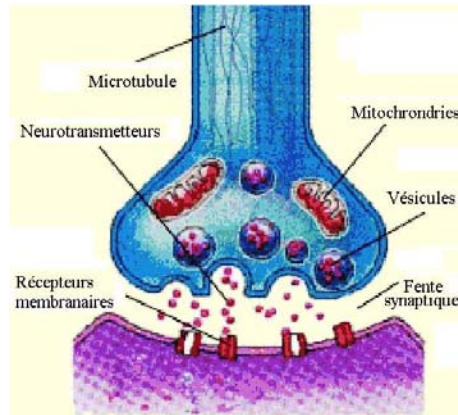


Fig. 2: La synapse, point de jonction entre deux neurones [6]

La transmission synaptique est donc un mécanisme omniprésent à l'origine de la grande plasticité de notre cerveau. Certains de ces influx sont excitateurs et favorisent le déclenchement d'un autre influx dans le neurone. Mais d'autres sont inhibiteurs et diminuent au contraire les probabilités de déclenchement d'un nouveau potentiel d'action.

De petits potentiels sont donc générés sur les dendrites et le corps cellulaire du neurone, suite à la fixation du neurotransmetteur sur son récepteur synaptique. La diffusion passive de ces potentiels récepteurs (leur intensité diminue avec le trajet) amène une sommation de leurs effets excitateurs ou inhibiteurs. C'est au niveau du cône d'implantation du neurone (endroit où l'axone sort du corps cellulaire) que le résultat de cette sommation va être déterminant.

S'il atteint le seuil d'excitation du neurone, un nouvel influx nerveux sera généré et s'élancera le long de l'axone. S'il reste en dessous, aucun influx nerveux ne sera transmis au neurone suivant. Contrairement aux potentiels récepteurs qui se propagent passivement en perdant de leur vélocité, l'influx nerveux généré à la base de l'axone, aussi appelé potentiel d'action, se propage activement sans perte de signal. Le potentiel d'action est le terme technique pour décrire l'influx nerveux.

Il s'agit d'une dépolarisation brève et réversible qui se propage le long de l'axone. Il diffère du potentiel récepteur (ou potentiel synaptique) à plusieurs égards. Un potentiel excitateur amène l'entrée de charges positives à l'intérieur du neurone. On dit alors que le neurone est dépolarisé parce que son potentiel membranaire est moins négatif que son

potentiel de repos (situé aux alentours de -70 mV). Un potentiel inhibiteur produit quant à lui un potentiel membranaire plus négatif que le potentiel de repos, l'éloignant d'autant plus du seuil de déclenchement du potentiel d'action. On dit alors que le neurone est hyperpolarisé.

Tout d'abord, le potentiel d'action ne se propage pas de façon passive, mais bien activement grâce à des canaux ioniques spéciaux que possède l'axone: les canaux sensibles au voltage. De plus, chez les mammifères, un dispositif particulier permet d'accélérer la propagation du potentiel d'action.

Ce processus requiert aussi de l'énergie de la part du neurone qui doit entretenir l'activité de pompes ioniques qui servent à rééquilibrer les charges de part et d'autre de la membrane après le passage d'un potentiel d'action. Les potentiels d'action sont aussi d'amplitude et d'intensité invariables. Leur génération fonctionne sur le mode 'tout ou rien'. Sous le seuil d'excitation du neurone, rien ne se passe. Par contre, que l'intensité du stimulus déclencheur soit à peine au-dessus du seuil ou le dépassant largement, cela ne fait aucune différence: un potentiel d'action, toujours pareil pour une cellule donnée, est produit.

Par conséquent, un neurone ne peut transmettre de l'information qu'en variant la fréquence de ses potentiels d'action, c'est-à-dire par le nombre de potentiels d'action émis en une seconde. Le potentiel d'action est donc un renversement temporaire du potentiel électrique de la membrane de l'axone qui dure à peine quelques millisecondes. Après le passage du potentiel d'action, il y a une brève période réfractaire durant laquelle la membrane ne peut plus être stimulée. Ce phénomène empêche le potentiel d'action de revenir en arrière et lui impose sa fuite en avant, telle une flamme qui parcourt une traînée de poudre.

3. MYELINISATION DES AXONES

Les avantages qu'offre la myéline en terme de préservation d'énergie et d'espace sont considérables. La myélinisation des axones accélère la conduction de l'influx nerveux d'une façon très originale, sans nécessiter de grands apports d'énergie supplémentaire et sans occuper beaucoup d'espace supplémentaire. Sans myéline, la moelle épinière devrait posséder un diamètre de plusieurs mètres pour que les vitesses de conduction y soient conservées.

L'axone revêt souvent une gaine isolante qui permet à l'influx nerveux de circuler plus rapidement. Cette gaine est faite d'une substance grasse, la myéline, formée par l'enroulement de la membrane d'une cellule gliale (Fig. 3). La myéline des neurones du cerveau provient des oligodendrocytes et celle des nerfs périphériques des cellules de Schwann. La vitesse de propagation du potentiel d'action dans un axone non myélinisé peut être lente que 0.5 m/s.

De son côté, la conduction saltatoire des axones myélinisés permet au potentiel d'action d'atteindre les 120 m/s, soit plus de 400 km/h! C'est ce qui permet à notre cerveau de communiquer avec notre gros orteil en quelques centièmes de seconde.

Les nœuds de Ranvier situés entre les régions myélinisées constituent une zone de faible résistance électrique au niveau de laquelle à peu près tous les canaux Na^+ de l'axone sont concentrés (Fig. 4). C'est donc à cet endroit que les potentiels d'action vont pouvoir se régénérer, après que les courants ioniques qui leur sont associés se soient propagés passivement le long de la gaine isolante entre deux nœuds.

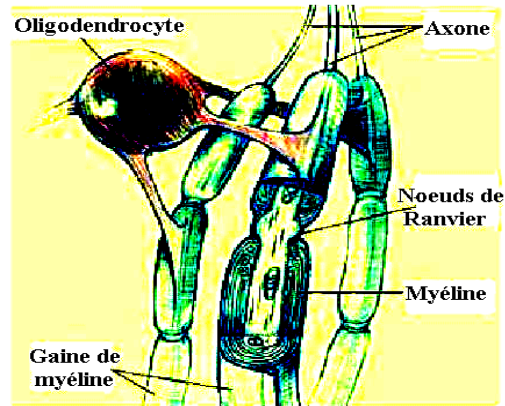


Fig. 3: Revêtement des axones par la gaine de myéline [6]

Cette propagation saltatoire permet au neurone de préserver son énergie puisque l'excitation active nécessaire à la propagation de l'influx est restreinte aux petites régions nodales.

Elle permet aussi une grande économie d'espace. En effet, une fibre non la vitesse de conduction est proportionnelle au diamètre de la fibre pour une fibre myélinisée et à la racine carrée du diamètre pour la fibre myélinisée. Cela veut dire qu'une fibre non myélinisée devrait avoir un calibre de plusieurs centimètres pour conduire l'influx à la même vitesse (100 m/s) qu'une fibre myélinisée de 20 μm de diamètre.

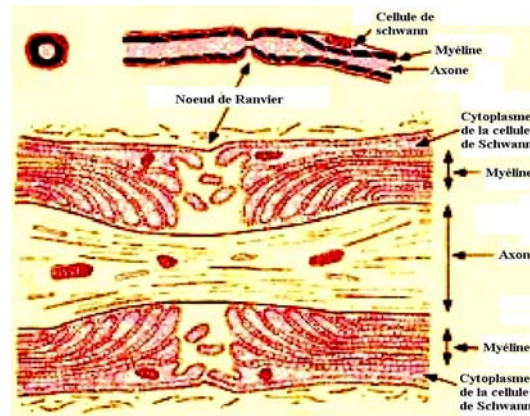


Fig. 4: Coupe transversale d'un axone

Cependant, l'influx nerveux peut aussi être transmis d'une cellule sensorielle réceptrice à un neurone, ou encore d'un neurone aux muscles pour les faire se contracter ou aux glandes pour leur faire sécréter leurs hormones. On parle alors de jonctions neuromusculaires ou neuroglandulaires [7].

Les travaux de centaines de laboratoires dans le monde ont permis d'identifier les principaux acteurs responsables de la transmission synaptique. Parmi eux, plus d'une soixantaine de neurotransmetteurs et des centaines de sous-types de récepteurs, comme un neurone peut relâcher plusieurs neurotransmetteurs différents à la fois, la soupe de

molécules et d'ions présents dans la fente synaptique ne peut être décodée que par une affinité très spécifique des neurotransmetteurs avec leurs récepteurs.

Une combinaison de neurotransmetteurs agissant sur différents sous-types de récepteurs pourra alors avoir différents effets, selon les récepteurs qu'ils affectent.

4. POTENTIALISATION A LONG TERME LTP

L'apprentissage repose sur la plasticité des circuits de notre cerveau, c'est-à-dire la capacité des neurones à modifier de façon durable l'efficacité de leur transmission synaptique. On peut dire donc que le cerveau stocke de l'information dans des réseaux de synapses modifiées (disposition de ces synapses constituant l'information) et qu'il récupère cette information en activant ces réseaux.

Tout réseau de neurone qui voit ses connexions renforcées n'est pas nécessairement le fruit d'un apprentissage conscient. En effet, notre cerveau est conçu pour détecter dans l'environnement complexe qui l'entoure des patterns reconnaissables qui seront encodés automatiquement dans ces réseaux neuronaux.

Dans le même ordre d'idée, certains apprentissages comme la reconnaissance des visages se font sans efforts alors que d'autres comme celui des mathématiques abstraites sont moins faciles pour nous. Cela dépend des réseaux déjà existant dans notre cerveau, réseaux dont la présence peut être compromise à la lumière de leur utilité dans l'évolution de notre espèce [8].

La compréhension des règles qui régissent l'association et la mise en réseaux de neurones remontent aux travaux fondateurs de D. Hebb, il y a plus d'un demi-siècle. Son intuition était que si deux neurones sont actifs en même temps, les synapses entre ces neurones seront renforcées. Ce postulat inspira plusieurs chercheurs et un premier mécanisme le supportant, la potentialisation à long terme (ou 'LTP'), un mécanisme de facilitation synaptique à la base de la mémoire.

La caractéristique la plus intéressante de ce mécanisme découvert en 1973 est qu'il permet le renforcement durable des synapses entre deux neurones qui sont activés simultanément. En effet, lorsque les axones qui font des connexions sur les neurones pyramidaux de l'hippocampe sont stimulés à haute fréquence, l'amplitude du potentiel exciteur enregistré dans ces neurones est augmentée pour une longue période (jusqu'à plusieurs semaines).

Les neurones impliqués dans l'établissement d'un réseau doivent déjà être connectés par des synapses pour que celles-ci soient renforcées ou affaiblies. Le façonnage d'un réseau s'effectue donc à partir et grâce à un câblage préexistant. Certains de ces réseaux pré-câblés, comme ceux de l'hippocampe, par exemple, jouent d'ailleurs un rôle clé dans la formation des souvenirs. De nos jours, la 'règle de Hebb', comme on l'appelle souvent, demeure l'un des facteurs déterminants pour prédire quelles synapses vont être renforcées dans un réseau de neurones.

Des recherches plus récentes ont permis de mettre en évidence d'autres caractéristiques de la mise en réseaux d'assemblées de neurones. On sait par exemple que la LTP qui mène au renforcement synaptique est très spécifique aux neurones actifs simultanément, et uniquement à ceux-là. On sait aussi qu'en plus d'être associative, la LTP peut aussi être coopérative: l'activité convergente de plusieurs neurones sur un seul facilite le renforcement de ces synapses.

Outre l'ouverture directe de canaux ioniques, la fixation des neurotransmetteurs sur leur récepteur met en branle plusieurs cascades de réactions chimiques dont un aperçu est donné sur le schéma (Fig. 5).

Plusieurs de ces réactions impliquent des seconds messagers. Ces molécules qui prennent le relais des neurotransmetteurs à l'intérieur du cytoplasme peuvent à leur tour provoquer l'ouverture ou la fermeture d'autres canaux ioniques. Ils peuvent aussi avoir des effets jusque dans le noyau du neurone et ainsi influencer la synthèse de nouvelles protéines, des récepteurs ou des canaux, par exemple, [9].

Ces canaux sont eux aussi de grosses protéines implantées dans la membrane. C'est l'ouverture sélective de l'ensemble de ces différents canaux qui, en changeant le potentiel électrique de la membrane, produit le potentiel d'action. C'est aussi grâce à ces réseaux que le calcium peut entrer dans le neurone pré-synaptique, lorsque le potentiel d'action arrive au bouton terminal, étape cruciale qui mène à la fusion des vésicules avec la membrane, expulsant du même coup les neurotransmetteurs.

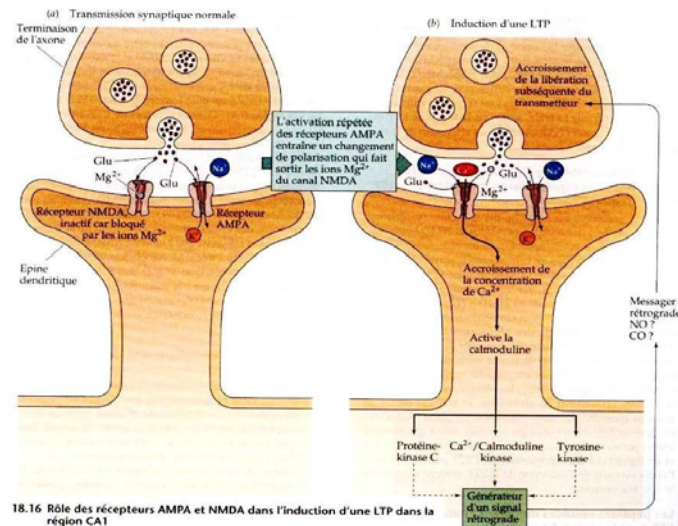


Fig. 5: Synapse capable de potentialisation à long terme [9]

Enfin, cet aperçu des éléments impliqués dans la neurotransmission ne serait pas complet sans dire un mot sur d'autres protéines transmembranaires qui recapturent le neurotransmetteur dans le neurone pré-synaptique ou qui pompent activement des ions contre leur gradient naturel à travers la membrane.

Le potentiel d'action est le terme technique pour décrire l'influx nerveux. Il s'agit d'une dépolarisation brève et réversible qui se propage le long de l'axone. Il diffère du potentiel récepteur (ou potentiel synaptique) à plusieurs égards. Tout d'abord, le potentiel d'action ne se propage pas de façon passive, mais bien activement grâce à des canaux ioniques spéciaux que possède l'axone: les canaux sensibles au voltage.

De plus, chez les mammifères, un dispositif particulier permet d'accélérer la propagation du potentiel d'action. Ce processus requiert aussi de l'énergie de la part du neurone qui doit entretenir l'activité de pompes ioniques qui servent à rééquilibrer les charges de part et d'autre de la membrane après le passage d'un potentiel d'action. Les

potentiels d'action sont aussi d'amplitude et d'intensité invariables. Leur génération fonctionne sur le mode 'tout ou rien'.

Sous le seuil d'excitation du neurone, rien ne se passe. Par contre, que l'intensité du stimulus déclencheur soit à peine au-dessus du seuil ou le dépassant largement, cela ne fait aucune différence: un potentiel d'action, toujours pareil pour une cellule donnée, est produit.

Par conséquent, un neurone ne peut transmettre de l'information qu'en variant la fréquence de ses potentiels d'action, c'est-à-dire par le nombre de potentiels d'action émis en une seconde. Le potentiel d'action est donc un renversement temporaire du potentiel électrique de la membrane de l'axone qui dure à peine quelques millisecondes.

Après le passage du potentiel d'action, il y a une brève période réfractaire durant laquelle la membrane ne peut plus être stimulée. Ce phénomène empêche le potentiel d'action de revenir en arrière et lui impose sa fuite en avant, telle une flamme qui parcourt une traînée de poudre.

Un potentiel excitateur amène l'entrée de charges positives à l'intérieur du neurone. On dit alors que le neurone est dépolarisé parce que son potentiel membranaire est moins négatif que son potentiel de repos (situé autour de -70 mV). Un potentiel inhibiteur produit quant à lui un potentiel membranaire plus négatif que le potentiel de repos, l'éloignant d'autant plus du seuil de déclenchement du potentiel d'action. On dit alors que le neurone est hyperpolarisé.

5. LES CELLULES GLIALES

Les astrocytes, comme la plupart des cellules gliales, ont longtemps été considérés essentiellement pour leur rôle de support et d'entretien du tissu nerveux [4]. Mais de plus en plus d'évidences plaident en faveur d'une implication beaucoup plus importante des astrocytes dans la communications nerveuse, (Fig. 6).

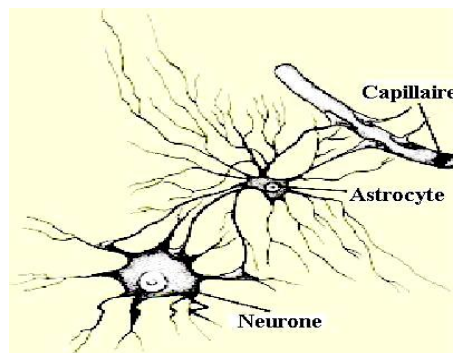


Fig. 6: Réseau d'astrocytes [4]

On connaît depuis longtemps leur rôle de pourvoyeur du glucose nécessaire à l'activité nerveuse. Grâce à leurs 'pieds' apposés contre la paroi des capillaires sanguins cérébraux, le glucose peut pénétrer dans les astrocytes où il est partiellement métabolisé et retransmis aux neurones. Il semble même qu'une activité synaptique plus intense favorise un apport plus élevé de glucose en activant le travail des astrocytes.

On sait aussi que les astrocytes sont couplés les uns aux autres par des 'gap-jonctions' à travers lesquels peut circuler divers métabolites. C'est par ces jonctions que

les astrocytes évacuent vers les capillaires le potassium extracellulaire excédentaire généré par une intense activité neuronale.

Mais ce qu'on découvre de plus en plus, c'est que ce réseau d'astrocytes communiquant forme un véritable syncytium, c'est-à-dire qu'ils se comportent comme un seul et même élément. A travers ce réseau, se propageraient par exemple, des vagues d'ions calcium dont l'effet régulateur pourrait se faire sentir dans un grand nombre de synapses en même temps [9], (Fig. 7).

Les prolongements astrocytaires qui entourent les synapses pourraient ainsi exercer un contrôle plus global sur la concentration ioniques et le volume aqueux dans les fentes synaptiques.

Le réseau astrocytaire constituerait donc un système de transmission non-synaptique qui se superposerait au système neuronal pour jouer un rôle majeur de modulation des activités neuronales.

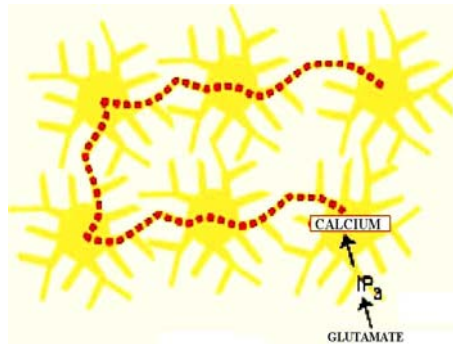


Fig. 7: Propagation d'ions de Ca dans le réseau astrocytaire [9]

6. LA CONDUCTION NERVEUSE

A l'origine de toute pensée et de toute action, il y a des influx nerveux qui parcourent nos neurones. Ceux-ci ne sont rien d'autre que le mouvement des molécules inorganiques chargées à travers la membrane neuronale. Mais ce mouvement de charges ne nous permettrait jamais d'avoir conscience de nous-mêmes, si leur coordination n'était déterminée par les propriétés des canaux de la membrane neuronale. Les propriétés de ces grosses protéines implantées dans la membrane sont quant à elles établies par notre génome, fruit de l'évolution.

Derrière la conduction nerveuse, il y a essentiellement des forces électriques et chimiques qui sont le moteur du mouvement des ions. Chaque ion subit en effet deux forces bien distinctes. Celle de son gradient de concentration chimique qui tend à bouger l'ion de la région la plus concentrée vers la moins concentrée. Et celle de la force électrostatique due à la charge de cet ion qui l'éloigne des charges semblables et le rapproche des charges opposées.

La propriété fondamentale de la membrane est d'être semi-perméable. En d'autres termes, de laisser passer certaines molécules chargées, appelées aussi ions, plus facilement que d'autres.

Parmi ces ions qui jouent un rôle important dans le système nerveux, le potassium (K^+) qui possède une charge positif est celui qui traverse le mieux la membrane au

repos. Le sodium (Na^+) qui a lui aussi une charge positive et le chlore (Cl^-) qui a une charge négative, circulent plus difficilement à travers la membrane [9]. De grosses molécules chargées négativement à l'intérieur de la cellule ne peuvent en sortir, mais influencent aussi le potentiel de la membrane.

Pour compléter le tableau, notons que l'ion calcium (Ca^{++}) joue aussi un rôle important, mais au niveau de la transmission synaptique. Le potentiel de repos est l'équilibre qui résulte de la répartition de ces ions de part et d'autre de la membrane. Dans cet état de base qui sera modifié par le passage de l'influx nerveux, l'intérieur du neurone est chargé négativement par rapport à l'extérieur. Ce potentiel de repos est d'environ - 70 millivolts.

Après avoir exposé sur la conduction et transmission nerveuse, et dans l'espoir d'élargir tous les horizons et les spectres d'assimilation du transport neuronale et notamment pour les transplantations et greffes, pourquoi pas l'implantation de composants électroniques miniatures, autrement dit des puces constituées de micro ou nano-jonctions qui maintiendraient l'influx nerveux.

Voici la partie, -qu'on espère sera d'un grand apport à tous les spécialistes et chercheurs agissant dans le domaine neurologique- consacrée à l'étude et la caractérisation des propriétés électroniques dans l'espace-temps d'une jonction P-N au silicium polarisée ou non, et ceux-là parmi les caractéristiques ci-après: les densités de porteurs de charges électrons et trous compris, les densités de courants, la caractéristique courant – tension pour différentes dimensions de la jonction. Le modèle ainsi que la méthode numérique utilisée rendent compte, de façon satisfaisante, les propriétés physiques de la jonction P-N.

7. LA JONCTION P-N

Soit un monocristal de semi-conducteur, dans lequel les concentrations des additifs, N_a et N_d , sont variables d'un point à un autre. Si dans l'hypothèse où tous les additifs sont ionisés à la température ambiante, il existe une surface que nous supposons généralement plane, sur laquelle $N_a = N_d$, on dit que c'est une jonction. Une jonction p- n est donc constituée par la juxtaposition de deux régions de types différents d'un même monocristal. La différence des densités de donneurs et d'accepteurs ($N_d - N_a$) passe par une valeur négative dans la région de type p à une valeur positive dans la région de type n.

La loi de variation de cette grandeur dépend essentiellement de la technique de fabrication. Nous limiterons notre étude de la jonction p- n au cas où le cristal est un barreau semi-conducteur au silicium, les concentrations N_a et N_d ne dépendant que d'une seule direction, x , sens de la longueur du barreau.

Nous nous limitons au cas unidimensionnel. La jonction est dite abrupte quand la concentration de donneurs N_d , par exemple, est indépendante de x (dopage uniforme en donneurs), N_a constant, supérieur à N_d , en $x < x_j$ (Fig. 8-a), x_j représente l'abscisse où $N_a = N_d$.

La concentration ($N_a = N_d$) est constante et positive à gauche de x_j (région P), et également constante, égale à $- N_d$, à droite de x_j (région N).

La jonction est dite graduelle quand la concentration N_d est constante, par exemple, depuis la journée du cristal, et N_a très grande sur la surface, et décroissante rapidement. Dans ce cas, le passage de la région P ($x < x_j$) à la région N ($x > x_j$) se fait progressivement, graduellement (Fig. 8-b).

L'usage de jonctions P-N (un semi-conducteur dopé P et un dopé N) est très utilisé pour tous les dispositifs de type diode (ne laisse passer le courant que dans un sens); ce genre de jonction fait apparaître des propriétés optiques intéressantes (diodes électroluminescentes, lasers à semi-conducteur,..).

Le mode de l'électronique ne saurait donc se passer de ces précieux semi-conducteurs, qui sont à la base de la plupart des dispositifs. L'étude de la jonction p- n est importante pour les applications électroniques et pour la compréhension du fonctionnement des composants à semi-conducteurs.

La caractéristique la plus importante de ces jonctions est la modulation de la direction du courant, le switchage et d'autres opérations dans les circuits électroniques. Cette jonction constitue la base de fabrication des thyristors et des transistors bipolaires, ainsi que pour les Jfet's et les Mosfet's.

Exposée à des radiations lumineuses, la jonction p- n peut fonctionner comme un dispositif à micro-onde ou un dispositif [10]. Différents modèles peuvent être utilisés pour étudier théoriquement les propriétés de la jonction: jonction abrupte, exponentielle, graduelle,.. [11-13]...

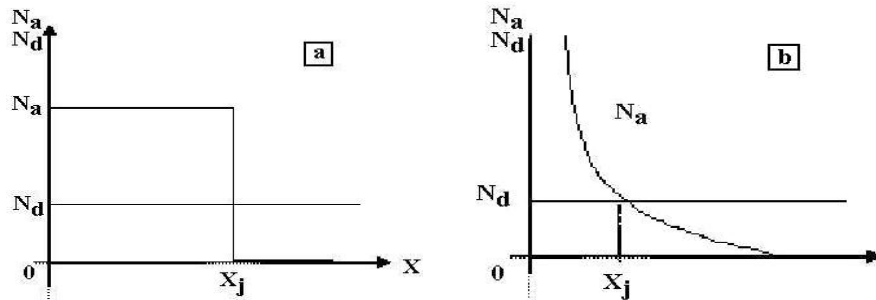


Fig. 8: Variation des concentrations des donneurs et des accepteurs dans une jonction abrupte (a) et dans une jonction graduelle diffusée (b)

Nous considérons un monobloc de semi-conducteur, dans lequel les concentrations des additifs, N_a et N_d sont variables d'un point à un autre. Si dans l'hypothèse où tous les additifs sont ionisés à la température ambiante, il existe une surface que nous supposons généralement plane, sur laquelle $N_a = N_d$, on dit que c'est une jonction.

La différence des densités de donneurs et d'accepteurs ($N_d - N_a$) passe d'une valeur négative dans la région de type p à une valeur positive n. La loi de variation de cette grandeur dépend essentiellement de la technique de fabrication.

Nous limiterons notre étude sur la jonction p- n au cas où le cristal est un barreau semi-conducteur au silicium, les concentrations N_a et N_d ne dépendant que d'une seule direction, x , sens de la longueur du barreau (Fig. 9). L'obtention d'une jonction

ne peut être acquise que par des techniques spéciales: alliage, diffusion, exptaxie, implantation ionique, etc. [10].

Le modèle de la jonction abrupte donne des résultats en très bon accord avec le comportement de la jonction. C'est le modèle que nous allons développer.

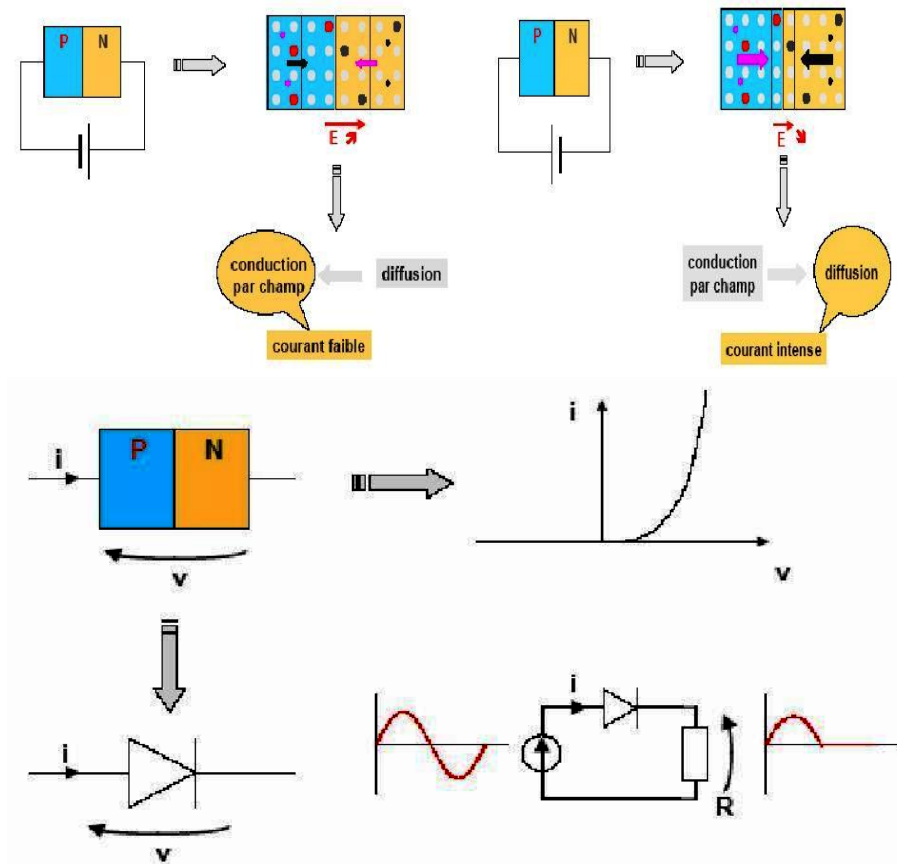


Fig. 9: Caractéristiques et fonctionnement d'une jonction P-N

8. MODELE PHYSIQUE D'UNE JONCTION P-N

Le modèle de la jonction abrupte donne des résultats en très bon accord avec le comportement de la mini jonction. C'est le modèle que nous allons développer.

Les équations de base utilisées dans la simulation de tout dispositif à semi-conducteurs sont les équations de continuité des électrons et des trous en fonction de la densité des porteurs j et du taux de génération-recombinaison G des porteurs [14-16]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \vec{\nabla} \cdot \vec{j}_n - q \cdot G \tag{1}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \vec{\nabla} \cdot \vec{j}_p - q \cdot G \tag{2}$$

Le champ électrique E et le potentiel V sont liés à la charge q dans le matériau par l'équation de Poisson:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = -\nabla^2 V = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon_r} (N_D - N_A + p - n) \quad (3)$$

8.1 Modèle numérique

La solution numérique de n'importe quel système d'équations nécessite que le domaine de simulation choisi pour représenter la géométrie du composant doit être partitionné en un nombre de régions discrètes, qui permettent à la méthode numérique d'achever la précision voulue. Les équations différentielles partielles qui constituent les équations caractérisant un semi-conducteur sont approximées dans chaque région par un ensemble d'équations qui décrivent les variables à des points spécifiques du domaine. Cette opération est appelée la discrétisation, et donne un ensemble d'équations non-linéaires [14].

Des techniques numériques sont alors employées pour résoudre cet ensemble d'équations. Parmi ces méthodes les plus utilisées pour la résolution de ces équations, c'est la méthode des différences finies et des éléments finis.

Dans ce qui suit, nous traiterons la méthode des différences finies dans laquelle évolue la méthode de Gummel et Scharfetter [14, 17-28].

8.2 Conditions et paramètres de calcul

Les données utilisées dans l'étude d'une jonction p- n au silicium à $T = 300$ K par la méthode de Gummel et Scharfetter [29] sont de $1.4 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ pour la concentration intrinsèque du silicium; de $10 \text{ }\mu\text{M}$ à $100 \text{ }\mu\text{M}$ pour la longueur de la jonction X_d ; de 0 à 1 V pour la tension de polarisation; de $8.4 \times 10^{-10} \text{ s}$ et $3 \times 10^{-10} \text{ s}$ pour les durées de vie des électrons τ_n et des trous τ_p respectivement.

8.3 Discussion

Pour étudier l'évolution spatiale des porteurs de charges électriques -électrons et trous, on considère d'abord le cas où la jonction n'est pas polarisée. A l'équilibre thermique, les densités de porteurs d'électrons et de trous majoritaires dans les cotés N et P sont essentiellement égales aux concentrations de dopage totalement ionisées N_d et N_a (jonction p- n symétrique).

L'interface considérée comme la zone dépeuplée par les porteurs libres majoritaires, mais occupée principalement par les ions négatifs et positifs, s'étend de $x = 0.002$ à 0.003 cm [27]. Au niveau de cette interface et à l'instant $t = 2 \text{ ns}$, existe un champ électrique dû aux ions de la zone de déplétion. Ce champ électrique décroît de 2.5 V/cm de la région P à la valeur -2 V/cm à la distance de $10 \text{ }\mu\text{m}$ de la jonction, pour ensuite croître symétriquement dans la région N et atteindre sa valeur maximale initiale à la distance $50 \text{ }\mu\text{m}$ dans la région N de la jonction.

La densité des porteurs libres dans cette région est négligeable, car l'équilibre thermodynamique et électrique est établi pour une polarisation nulle de la jonction p- n. En outre, les frontières entre la zone dépeuplée et les zones neutres de la jonction sont très abruptes [27].

La présence du champ électrique entraîne une différence de potentiel, le potentiel de diffusion V_d , entre les régions P et N neutres de la jonction p-n. Cette barrière de potentiel et le champ électrique qui l'accompagne dirigé de la région N vers P, s'opposent au passage des porteurs majoritaires d'une région à l'autre.

Cette opposition n'est cependant pas totale, car on sait qu'à $T \neq 0$ °K, il existe toujours des électrons et des trous qui possèdent des énergies importantes, mais leur nombre décroît exponentiellement avec l'énergie considérée. Il en résulte que la tension de diffusion limite, mais n'empêche pas totalement le passage des trous de P vers N, ni celui des électrons de N vers P.

Des côtés N et P de la jonction, les concentrations des porteurs de charge atteignent des niveaux constants [27, 29]. L'évolution spatiale des densités de porteurs que nous avons étudié correspond parfaitement au profil des porteurs prévu par le modèle de Shockley [11], ainsi que dans les références [27, 29].

Lorsque l'on polarise la jonction avec une tension V positive, on modifie la barrière de potentiel et par suite la diffusion des porteurs d'une région vers l'autre, et par conséquent, la densité de courant total, à savoir: les courants d'électrons J_n , de trous J_p et de diffusion J_D (Fig. 10).

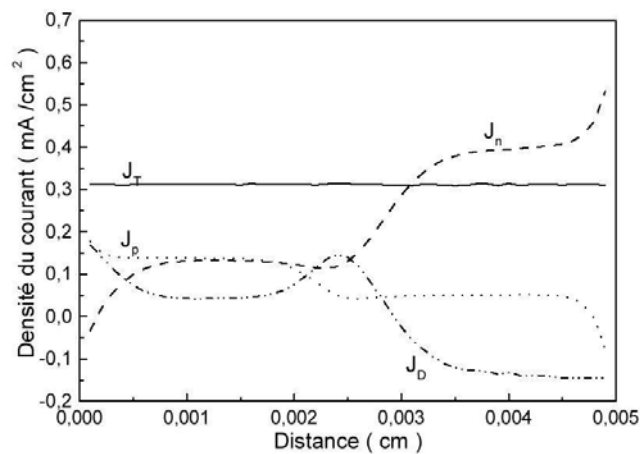


Fig. 10: Evolution spatiale des densités de courant dans une jonction P-N au silicium sous une polarisation $V = 0,4$ V à $t = 2$ ns

La barrière de potentiel de hauteur $q \times (V_d - V)$ n'est plus suffisante pour arrêter la diffusion des porteurs, les électrons diffusent de la région N vers la région P, et les trous de la région P vers la région N. La jonction est polarisée dans le sens direct, le courant direct circule de la région P vers la région N.

La tension appliquée n'est pas suffisante à créer une concentration importante de porteurs. La densité de porteurs de charge dans la jonction n'a quasiment pas changé, car nous nous sommes placés dans l'hypothèse de faible niveau d'injection.

C'est-à-dire que dans chacune des régions, les porteurs majoritaires à l'équilibre thermodynamique restent majoritaires, lorsque la jonction est polarisée. En d'autres termes, nous supposons que la densité de porteurs majoritaires dans chacune des régions n'est pas affectée par la polarisation (Fig. 11-a et Fig. 11-b)

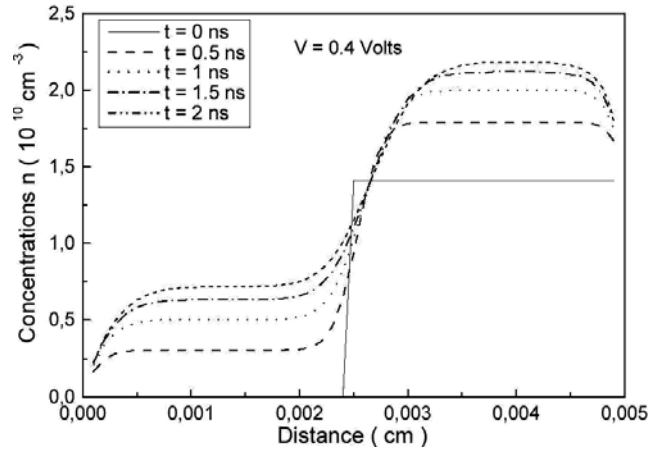


Fig. 11-a: Evolution spatio-temporelle de la concentration des électrons de la jonction P-N au silicium sous une polarisation $V = 0,4$ V

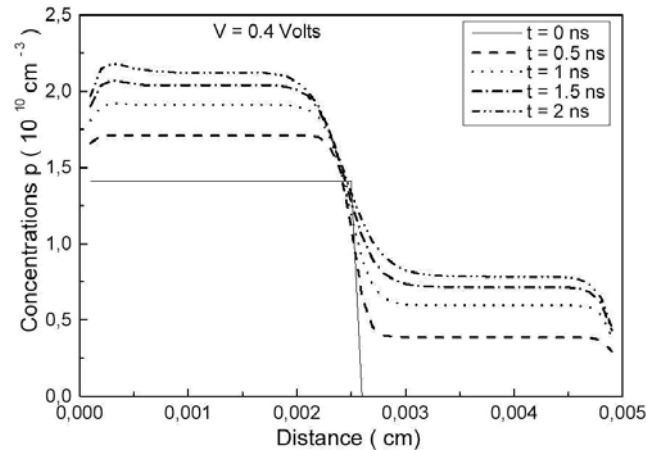


Fig. 11-b: Evolution spatio-temporelle de la concentration des trous dans une jonction P-N au silicium sous une polarisation $V = 0,4$ V

La jonction p – n est le siège de générations et recombinaisons thermiques. A l'interface, la densité de porteurs est faible à cause des recombinaisons qui sont importantes et prédominantes.

En conséquence, en raison des phénomènes de génération – recombinaison, les courants des électrons et des trous ne sont pas constants à la traversée de l'interface de la jonction en $x = x_j$, mais sont modifiés par les créations par le biais d'impacts en plus des recombinaisons des porteurs (Fig. 12).

Cela est justifié justement par le taux de génération – recombinaison G {éq. (1) et (2)} qui diffère de la région N à la région P de la jonction polarisée en direct. Ce taux de génération – recombinaison qui est régi par la durée de vie des porteurs minoritaires,

évolue avec la dimension x_d de la jonction p – n polarisée. Quand la jonction n'est pas polarisée, le taux G est dû principalement au taux de $g - r$ thermique, $G_{\text{thermique}}$.

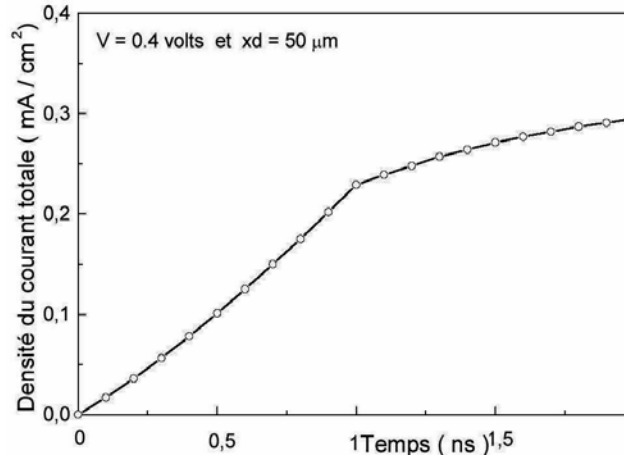


Fig. 12: Evolution temporelle de la densité de courant totale dans une jonction P-N au silicium sous une polarisation $V = 0,4 \text{ V}$ et pour $x_d = 50 \mu\text{m}$

En polarisant la jonction, l'impact des ions participe plus à ce phénomène de $g - r$, et ce taux G_{impact} contribue plus au taux total $g - r$, G . Le taux G est important aux bords de la jonction où la densité de porteurs majoritaires est maximale, et selon que l'impact ionique est important.

Une tension directe appliquée à la jonction diminue la hauteur de la barrière de potentiel. La résistance propre à la jonction diminue, ce qui implique que la densité de courant totale de la jonction augmente et croît avec les tensions appliquées 0.1 V, 0.4 V et 0.7 V dans le temps et diminue avec la dimension de l'échantillon (Fig. 12 et 13).

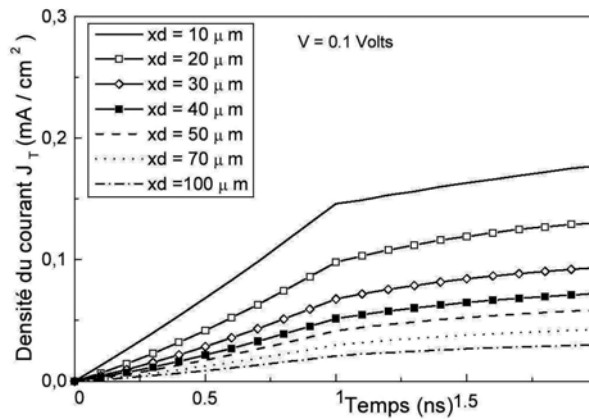


Fig. 13: Evolution temporelle de la densité de courant totale dans une jonction P-N au silicium sous une polarisation $V = 0,1 \text{ V}$ et pour plusieurs dimensions x_d

A partir d'une polarisation $V = 1$ volt de la jonction p – n, la densité de courant tend vers une certaine valeur constante [27], car généralement dans les jonctions p – n, la valeur de la tension directe est inférieure à 1 V, afin d'éviter la tension causant le claquage de la jonction [10].

9. CONCLUSION

La méthode de simulation de Gummel et Scharfetter permet de calculer les principaux paramètres dans la micro-jonction abrupte, comme les densités de porteurs de charges, les densités de courant, le champ et le potentiel électriques en fonction du temps ou de la polarité de jonction.

La caractéristique courant – tension calculée en polarisation directe de la jonction abrupte, a donné des résultats satisfaisants en accord avec les propriétés physiques d'une jonction p – n [5, 27].

La méthode de simulation utilisée pour le modèle de la jonction p – n abrupte permet donc le calcul et l'étude de n'importe quel paramètre physique de la jonction avec une exactitude impressionnante et satisfaisante à la fois.

La méthode de simulation de Gummel et Scharfetter est une méthode qui a déjà fait ses preuves et apporté des solutions dans la résolution de problèmes physiques dans beaucoup de systèmes, là où les calculs analytiques ou ne permettent pas d'aboutir aux résultats envisageables, ou bien qu'ils étaient trop extravagants et tortueux, fournit d'importants résultats quant à l'évolution des caractéristiques et propriétés d'une jonction p – n, ce qui permettra aux biophysiciens et aux chirurgiens de coopérer pour trouver les solutions adéquates et appropriées au traitement des maladies du système nerveux chez l'être humain en premier lieu.

REFERENCES

- [1] P.J. Hollenbeek, '*Methods and Applications for Cell Biologist*', Bibl. SC. QH631, A1 M592 71.
- [2] H.J. Federoff, '*Parkinson Disease: The Life Cycle of the Dopamine Neuron*', New York Academy of Sciences, 2003.
- [3] L.C. Triarhou, '*Dopaminergie NeuronTranplantation in the Weaver Mouse Model of Parkinson's Disease*', Bibl. sc. W1 A244 517, Editeur Springer, 2003.
- [4] D. Tritsch, D. Chesnoy-Marchais et A. Feltz, '*Physiologie du Neurone*', Bibl. sc. WL 102.5 1839, 2^{ème} Edition, Doin, 1998.
- [5] T. Zigova, P. Sanberg and J. Sanchez-Ramos, '*Neural Stem Cells: Methods and Protocols*', Methods in Molecular Biology, Vol. 198, Humana Press, 2002.
- [6] R. Yuste et al., '*Imaging Neurons*', Bibl. sc. WL 102.5 131, 2000.
- [7] E.R. Kandel, J.H. Schwartz and T.M. Jessell, '*Principles of Neural Science*', 4th Edition, Mc Graw Hill, Bibl. sc. WL 102 P957, 2000.
- [8] J.P. Changeux, '*Neural Man: the Biologist of Mind*', Bibl. sc. Hum & soc, WL 102,5 C456, Princeton University Press, 1985.
- [9] G. Bock, '*Sodium Channels and Neuronal Hyperexcitability*', Novartis Foundation, John Wiley & Sons, 2002.

- [10] S.M. Sze, '*Semiconductor Devices Physics and Technology*', Edited by John Wiley & Sons, NY, pp. 522, 1985.
- [11] W. Schockley, '*A Unipolar Field-Effect Transistor*', Proceedings IRE, Vol. 40, N°11, pp. 1289 – 1313, 1952.
- [12] M. Filoche, '*Digital Simulation of Micro-Opto Electronic Components*', The Echo of Research, N°148, pp. 41 – 48, 1992.
- [13] A.H. Marshak, '*Transport Equations for Highly Doped Devices and Heterostructures*', Solid-State Electronics, Vol. 30, N°11, pp. 1089 – 1093, 1987.
- [14] C.M. Snowden, '*Semiconductor Device Modelling*', Stevenage, Published by P. Peregrinus Ltd, London, U.K., 1988.
- [15] H. Mathieu, '*Physics of Semiconductors and Electronic Devices*', 3rd Masson Edition, 547 p., 1996.
- [16] S.S. De, A.K. Ghosh, A. Hajra, J.C. Halder and M. Bera, '*Studies on Temperature and Concentration Dependant Minority Carrier Lifetime in Heavily Doped InGaAsP*', Solid-State Electronics, Vol. 37, N°7, pp. 1455 – 1457, 1994.
- [17] S.N. Mohammad, '*Unified Model for Drift Velocities of Electrons and Holes in Semiconductors as a Function of Temperature and Electric Field*', Solid-State Electronics, Vol. 35, N°10, pp. 1391 – 1396, 1992.
- [18] H. Lin, N. Goldsman and I.D. Mayergoyz, '*Device Modelling by Deterministic Self-Consistent Solution of Poisson and Boltzmann Transport Equations*', Solid-State Electronics, Vol. 35, N°6, pp. 769 – 778, 1992.
- [19] J.J. Liou, '*Semiconductor Device Physics and Modelling. I: Overview of fundamental theories and equations*', IEE Proceedings, Part G- Circuits Devices and Systems, Vol. 139, N°6, pp. 646 – 654, 1992.
- [20] S.P. Singh, N. Goldsman and I.D. Mayergoyz, '*Modelling Multi-Band Effects of Hot Electron Transport in Silicon by Self-Consistent Solution of the Boltzmann Transport and Poisson Equations*', Solid-State Electronics, Vol. 39, N°12, pp. 1695 – 1700, 1996.
- [21] M.C. Vecchi and L.G. Reyna, '*Generalized Energy Transport Models for Semiconductor Device Simulation*', Solid-State Electronics, Vol. 37, N°10, pp. 1705 – 1716, 1994.
- [22] H. Kobeissi, F.M. Ghannouchi and A. Khebir, '*Finite Element Solution of the Nonlinear Poisson Equation for Semiconductor Devices Using The Fixed-Point Iteration Method*', Journal of Applied Physics, Vol. 74, N°10, pp. 6186 – 6490, 1993.
- [23] O.E. Akcasu, '*Convergence Properties of Newton's Method for the Solution of the Semiconductor Transport Equations and Hybrid Solution Techniques for Multidimensional Simulation of VLSI Devices*', Solid-State Electronics, Vol. 27, N°4, pp. 319 – 328, 1984.
- [24] A. Yoshii, M. Tomizawa and K. Yokoyama, '*Investigation of Numerical Algorithms in Semiconductor Device Simulation*', Solid-State Electronics, Vol. 30, N°8, pp. 813 – 820, 1987.
- [25] M. Kurata, '*Numerical Analysis for Semiconductor Devices*', Lexington, MA Heath, 1982.
- [26] I. Benaïssa, '*Transport Phenomena in Materials and Heterostructures*', Magister Thesis, USTO, Oran, 2001.
- [27] I. Benaïssa, S. Hiadsi et A. Belaïdi, '*Spatio-Temporel Simulation of a Microjunction*', Journal of Applied Sciences, Vol. 6, N°9, pp. 1959 – 1965, 2006.

- [28] D.L. Scharfetter and H.K. Gummel, '*Large-Scale Analysis of a Silicon Read Diode Oscillator*', IEEE Transaction Electron Devices, Vol. ED-16, pp. 64 – 77, 1969.
- [29] M. Zommiti, '*Characterisation of Silicon Solar Cells*', Doctorate Thesis, USTL, Montpellier, 1982.