

# Table des matières

|                                                                                         |          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>Remerciements</b> . . . . .                                                          | <b>1</b> |
| <b>Introduction</b> . . . . .                                                           | <b>3</b> |
| <b>Chapitre 1. Traitement de l'information</b> . . . . .                                | <b>7</b> |
| 1.1. Généralités . . . . .                                                              | 7        |
| 1.1.1. Le codage. . . . .                                                               | 8        |
| 1.1.2. La mémorisation . . . . .                                                        | 10       |
| 1.2. Les machines de traitement de l'information . . . . .                              | 11       |
| 1.2.1. La machine de Turing . . . . .                                                   | 11       |
| 1.2.2. L'architecture de von Neumann . . . . .                                          | 12       |
| 1.2.3. La technologie CMOS . . . . .                                                    | 14       |
| 1.2.4. L'évolution des performances des microprocesseurs . . . . .                      | 19       |
| 1.3. L'information et l'énergie . . . . .                                               | 22       |
| 1.3.1. Puissance et énergie dissipée dans les portes et circuits CMOS. . . . .          | 22       |
| 1.3.1.1. Puissance et énergie dissipée lors des transitions<br>des portes CMOS. . . . . | 23       |
| 1.3.1.2. Comment réduire l'énergie dissipée $C_L V_{dd}^2$ ? . . . . .                  | 26       |
| 1.3.1.3. Puissance dissipée dans un circuit CMOS . . . . .                              | 29       |
| 1.4. Les technologies du futur. . . . .                                                 | 30       |
| 1.4.1. L'évolution du système « codage binaire-von Neumann-CMOS » . . . . .             | 31       |
| 1.4.1.1. Les nouveaux interrupteurs . . . . .                                           | 32       |
| 1.4.1.2. Le changement de variable d'état . . . . .                                     | 34       |
| 1.4.2. Les approches révolutionnaires. . . . .                                          | 35       |

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| 1.4.2.1. Le calcul quantique . . . . .                           | 35 |
| 1.4.2.2. Le traitement neuro-inspiré de l'information . . . . .  | 41 |
| 1.5. Le microprocesseur et le cerveau . . . . .                  | 42 |
| 1.5.1. Paramètres physiques. . . . .                             | 44 |
| 1.5.1.1. Surface et volume . . . . .                             | 44 |
| 1.5.1.2. Nombre et taille des dispositifs élémentaires . . . . . | 44 |
| 1.5.1.3. Interconnexions. . . . .                                | 44 |
| 1.5.1.4. Puissance dissipée . . . . .                            | 46 |
| 1.5.2. Traitement des données . . . . .                          | 46 |
| 1.5.2.1. Le codage des informations. . . . .                     | 47 |
| 1.5.2.2. La fréquence de fonctionnement. . . . .                 | 47 |
| 1.5.2.3. Les protocoles de traitement . . . . .                  | 47 |
| 1.5.2.4. Le mode de calcul . . . . .                             | 48 |
| 1.5.3. Mémorisation des informations. . . . .                    | 48 |
| 1.6. Conclusion . . . . .                                        | 49 |

## Chapitre 2. Traitement de l'information dans le vivant . . . . . 51

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Le cerveau en bref. . . . .                                    | 52 |
| 2.1.1. Les fonctions du cerveau. . . . .                            | 52 |
| 2.1.2. L'anatomie du cerveau. . . . .                               | 52 |
| 2.2. Le cortex . . . . .                                            | 54 |
| 2.2.1. Structure . . . . .                                          | 54 |
| 2.2.2. Organisation hiérarchique du cortex . . . . .                | 55 |
| 2.2.3. Colonnnes corticales . . . . .                               | 58 |
| 2.2.4. Connexions intra- et intercolonnes. . . . .                  | 58 |
| 2.2.4.1. Connexions intracolonnes. . . . .                          | 58 |
| 2.2.4.2. Connexions intercolonnes. . . . .                          | 59 |
| 2.3. Un exemple emblématique : le cortex visuel . . . . .           | 60 |
| 2.3.1. L'œil et la rétine. . . . .                                  | 61 |
| 2.3.1.1. Les photorécepteurs . . . . .                              | 61 |
| 2.3.1.2. Les cellules horizontales . . . . .                        | 62 |
| 2.3.1.3. Les cellules bipolaires . . . . .                          | 62 |
| 2.3.1.4. Les cellules amacrines. . . . .                            | 62 |
| 2.3.1.5. Les cellules ganglionnaires . . . . .                      | 62 |
| 2.3.2. Le nerf optique . . . . .                                    | 63 |
| 2.3.3. Le cortex V1 . . . . .                                       | 63 |
| 2.3.4. Les aires visuelles supérieures V2, V3, V4, V5, IT . . . . . | 65 |
| 2.3.5. En résumé . . . . .                                          | 66 |
| 2.4. Conclusion . . . . .                                           | 66 |

|                                                                                           |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Chapitre 3. Neurones et synapses . . . . .</b>                                         | <b>69</b> |
| 3.1. Généralités . . . . .                                                                | 69        |
| 3.1.1. Le neurone . . . . .                                                               | 69        |
| 3.1.2. Les synapses . . . . .                                                             | 71        |
| 3.2. La membrane cellulaire. . . . .                                                      | 74        |
| 3.2.1. La structure de la membrane . . . . .                                              | 74        |
| 3.2.2. Les milieux intra- et extracellulaires. . . . .                                    | 75        |
| 3.2.3. Les protéines transmembranaires. . . . .                                           | 76        |
| 3.2.3.1. Les canaux ioniques . . . . .                                                    | 76        |
| 3.2.3.2. Les pompes ioniques. . . . .                                                     | 77        |
| 3.3. La membrane à l'équilibre . . . . .                                                  | 79        |
| 3.3.1. Le potentiel de repos $V_r$ . . . . .                                              | 83        |
| 3.3.1.1. Modèle simplifié du potentiel de repos . . . . .                                 | 83        |
| 3.3.1.2. Modèle complet de $V_r$ . . . . .                                                | 84        |
| 3.3.1.3. Conclusion. . . . .                                                              | 85        |
| 3.4. La membrane en régime dynamique . . . . .                                            | 86        |
| 3.4.1. Le modèle de Hodgkin et Huxley . . . . .                                           | 89        |
| 3.4.1.1. Bases mathématiques et équations du modèle . . . . .                             | 89        |
| 3.4.1.2. Courants sodiques et potassiques . . . . .                                       | 90        |
| 3.4.1.3. Paramètres du modèle HH . . . . .                                                | 91        |
| 3.4.1.4. Analyse dynamique : réponse à une impulsion du courant<br>d'excitation . . . . . | 94        |
| 3.4.1.5. Excitation conduisant à une rafale de potentiels d'action . . . . .              | 98        |
| 3.4.2. Au-delà du modèle de Hodgkin et Huxley . . . . .                                   | 99        |
| 3.4.3. Les modèles HH simplifiés . . . . .                                                | 100       |
| 3.4.3.1. La méthode du plan de phase. . . . .                                             | 100       |
| 3.4.3.2. Le modèle de FitzHugh . . . . .                                                  | 101       |
| 3.4.3.3. Le modèle de Morris et Lecar . . . . .                                           | 104       |
| 3.4.3.4. Les modèles phénoménologiques . . . . .                                          | 107       |
| 3.4.4. Application des modèles de membrane . . . . .                                      | 109       |
| 3.4.4.1. Du modèle de membrane au modèle de neurone . . . . .                             | 109       |
| 3.4.4.2. La propagation des <i>spikes</i> dans l'axone. . . . .                           | 110       |
| 3.4.4.3. La membrane comme filtre passe-bas. . . . .                                      | 116       |
| 3.4.4.4. Le bruit. . . . .                                                                | 118       |
| 3.5. Les synapses . . . . .                                                               | 120       |
| 3.5.1. Les caractéristiques biologiques . . . . .                                         | 120       |
| 3.5.2. La plasticité synaptique . . . . .                                                 | 122       |
| 3.5.2.1. Le poids synaptique . . . . .                                                    | 122       |
| 3.5.2.2. L'apprentissage. . . . .                                                         | 123       |
| 3.6. Conclusion . . . . .                                                                 | 125       |

|                                                                              |                |
|------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| <b>Chapitre 4. Réseaux de neurones artificiels.</b>                          | <b>127</b>     |
| 4.1. Les réseaux de neurones logiciels.                                      | 128            |
| 4.1.1. Les modèles de neurones et de synapses                                | 128            |
| 4.1.1.1. Le perceptron                                                       | 128            |
| 4.1.1.2. Les neurones à <i>spikes</i>                                        | 130            |
| 4.1.2. L'architecture des réseaux.                                           | 131            |
| 4.1.2.1. Le perceptron multicouche ou réseau <i>feedforward</i>              | 131            |
| 4.1.2.2. Les réseaux convolutifs                                             | 132            |
| 4.1.2.3. Les réseaux récurrents                                              | 133            |
| 4.1.2.4. Le <i>Reservoir Computing</i>                                       | 135            |
| 4.1.2.5. Conclusion.                                                         | 136            |
| 4.1.3. L'apprentissage                                                       | 136            |
| 4.1.3.1. L'apprentissage supervisé.                                          | 138            |
| 4.1.3.2. L'apprentissage non supervisé                                       | 142            |
| 4.1.4. Conclusion                                                            | 142            |
| 4.2. Les réseaux de neurones matériels                                       | 144            |
| 4.2.1. Physique comparée des systèmes biologiques<br>et des semi-conducteurs | 144            |
| 4.2.2. Circuits simulant le neurone.                                         | 149            |
| 4.2.2.1. Le fonctionnement du MOS sous le seuil                              | 150            |
| 4.2.2.2. Le mode de courant                                                  | 153            |
| 4.2.2.3. Le mode de tension.                                                 | 157            |
| 4.2.3. Circuits simulant la synapse.                                         | 180            |
| 4.2.3.1. Introduction                                                        | 180            |
| 4.2.3.2. Les mémoires électroniques                                          | 182            |
| 4.2.4. Circuits pour l'apprentissage                                         | 188            |
| 4.2.5. Exemples de réseaux de neurones matériels                             | 190            |
| 4.2.5.1. Les circuits simples                                                | 190            |
| 4.2.5.2. Les RNA complexes                                                   | 196            |
| 4.2.5.3. BrainScaleS                                                         | 196            |
| 4.2.5.4. Loihi                                                               | 197            |
| 4.2.5.5. TrueNorth                                                           | 198            |
| 4.3. Conclusion                                                              | 200            |
| <br><b>Bibliographie</b>                                                     | <br><b>201</b> |
| <br><b>Index</b>                                                             | <br><b>209</b> |