

Table des matières

Préface	17
José DEL R. MILLÁN	
Introduction	19
Maureen CLERC, Laurent BOUGRAIN et Fabien LOTTE	
PREMIÈRE PARTIE. ANATOMIE ET PHYSIOLOGIE	29
Chapitre 1. Anatomie du système nerveux	31
Matthieu KANDEL et Maude TOLLET	
1.1. Description générale du système nerveux	31
1.2. Le système nerveux central	33
1.2.1. Le télencéphale	33
1.2.1.1. Le lobe frontal	35
1.2.1.2. Le lobe pariétal	36
1.2.1.3. Le lobe temporal	36
1.2.1.4. Le lobe occipital	37
1.2.1.5. L'insula ou lobe de l'insula	37
1.2.2. Le diencéphale	37
1.2.3. Le tronc cérébral	39
1.3. Le cervelet	40
1.4. La moelle épinière et les racines	42
1.5. Le système nerveux périphérique	44
1.5.1. Le nerf	44
1.5.2. Organisation générale du SNP	45
1.5.3. Le système nerveux autonome	46

1.6. Quelques syndromes et pathologies visées par les interfaces cerveau-ordinateur	46
1.6.1. Syndromes moteurs	46
1.6.2. Quelques pathologies accessibles aux BCI	47
1.7. Conclusion	49
1.8. Bibliographie	49

Chapitre 2. Imagerie fonctionnelle cérébrale 51

Christian-George BÉNAR

2.1. L'IRM fonctionnelle	52
2.1.1. Principes de base de l'IRM	52
2.1.2. Principes de l'IRMf	52
2.1.3. Analyse statistique des données : le modèle linéaire	53
2.1.4. Analyse en composantes indépendantes	54
2.1.5. Mesures de connectivité	55
2.2. Electrophysiologie : EEG et MEG	56
2.2.1. Principes de base de la génération des signaux	56
2.2.2. Potentiels et champs évoqués	56
2.2.3. Localisation de sources	57
2.2.4. Analyse en composantes indépendantes	58
2.2.5. Analyse temps-fréquence	59
2.2.6. Connectivité	60
2.2.7. Analyse statistique	61
2.3. EEG-IRMf simultanés	61
2.3.1. Principes de la méthode	61
2.3.2. Applications et analyse des données	61
2.3.3. Liens entre électrophysiologie et IRMf	62
2.4. Discussion et pistes futures	62
2.5. Bibliographie	64

Chapitre 3. Electrogenèse cérébrale 69

Franck VIDAL

3.1. Les activités électriques neuronales à l'origine de l'EEG	69
3.1.1. Potentiels d'actions et potentiels postsynaptiques	69
3.1.2. Potentiel de repos, gradient électrochimique et potentiels postsynaptiques	71
3.1.3. Des potentiels postsynaptiques à l'EEG	72
3.2. Champs dipolaire et quadrupolaire	74
3.2.1. Champ créé par un courant d'ions dû à l'ouverture de canaux ioniques	74
3.2.1.1. Champ créé par une entrée d'ions au niveau d'une synapse (PPS)	75

3.2.1.2. Champ créé par une entrée d'ions au niveau de l'axone (PA)	75
3.2.1.3. Champ créé par d'autres activités neuronales	77
3.2.2. Déterminants de la valeur du potentiel créé par un courant d'ions	78
3.3. Importance de la géométrie des ensembles générateurs	79
3.3.1. Sommation spatiale, champs fermés et champs ouverts	79
3.3.2. Effet de la position des synapses sur la polarité des activités mesurées	81
3.3.3. Effet de la position des zones activées	82
3.4. Influence des milieux conducteurs	83
3.4.1. Influence des cellules gliales	83
3.4.2. Influence des os du crâne	84
3.5. Conclusion	84
3.6. Bibliographie	85

Chapitre 4. Marqueurs physiologiques pour le contrôle de BCI actives/réactives 87

François CABESTAING et Philippe DERAMBURE

4.1. Introduction	87
4.2. Marqueurs permettant le contrôle d'interfaces actives	91
4.2.1. Variations spatio-temporelles de potentiels	92
4.2.1.1. Variations lentes du potentiel cortical moyen	92
4.2.1.2. <i>Bereitschaftspotential</i> ou <i>Readiness Potential</i>	92
4.2.2. Variations spatio-temporelles de rythmes	93
4.3. Marqueurs permettant le contrôle d'interfaces réactives	96
4.3.1. Potentiels évoqués sensoriels	96
4.3.1.1. Potentiels évoqués visuels stationnaires	96
4.3.1.2. Autres potentiels <i>steady-state</i> : SSAEP, ASSR et SSSEP	98
4.3.2. Potentiel endogène P300	98
4.4. Conclusion	100
4.5. Bibliographie	100

Chapitre 5. Marqueurs neurophysiologiques pour les interfaces cerveau-ordinateur passives 105

Raphaëlle N. ROY et Jérémie FREY

5.1. BCI passives et états mentaux	105
5.1.1. BCI passives : définition	105
5.1.2. Notion d'états mentaux	106
5.1.3. Grandes catégories de marqueurs neurophysiologiques	106

5.2. Charge mentale	107
5.2.1. Définition	107
5.2.2. Marqueurs comportementaux	107
5.2.3. Marqueurs EEG	107
5.2.4. Exemple d'application : contrôle aérien	108
5.3. Fatigue mentale et vigilance	108
5.3.1. Définition	108
5.3.2. Marqueurs comportementaux	109
5.3.3. Marqueurs EEG	109
5.3.4. Exemple d'application : conduite automobile	109
5.4. Attention	110
5.4.1. Définition	110
5.4.2. Marqueurs comportementaux	110
5.4.3. Marqueurs EEG	110
5.4.4. Exemple d'application : enseignement	111
5.5. Détection des erreurs	111
5.5.1. Définition	111
5.5.2. Marqueurs comportementaux	112
5.5.3. Marqueurs EEG	112
5.5.4. Exemple d'application : interfaces tactiles et robotique	112
5.6. Emotions	113
5.6.1. Définition	113
5.6.2. Marqueurs comportementaux	113
5.6.3. Marqueurs EEG	113
5.6.4. Exemples d'application : communication et développement personnel	114
5.7. Conclusion	114
5.8. Bibliographie	115

DEUXIÈME PARTIE. TRAITEMENT DU SIGNAL ET APPRENTISSAGE 121

Chapitre 6. Prétraitements de données d'électro-encéphalographie 123

Maureen CLERC

6.1. Introduction	123
6.2. Principes d'acquisition de l'EEG	124
6.2.1. Montage	124
6.2.2. Echantillonnage	125
6.2.3. Quantification	125
6.3. Représentation temporelle et segmentation	125
6.3.1. Débruitage	126
6.3.2. Séparation de composantes	126

6.4. Représentation fréquentielle et filtrage	126
6.4.1. Débruitage	128
6.4.2. Séparation de composantes	128
6.5. Représentations temps-fréquence	128
6.5.1. Atome temps-fréquence	129
6.5.2. Transformée de Fourier à fenêtre	130
6.5.3. Transformée en ondelettes	131
6.5.3.1. Transformée en ondelettes ou filtrage multi-échelles	132
6.5.4. Transformées temps-fréquence de signaux discrets	132
6.5.5. Vers d'autres représentations redondantes	133
6.6. Représentations spatiales	134
6.6.1. Représentation topographique	134
6.6.2. Filtrage spatial	135
6.6.2.1. Laplacien de surface	135
6.6.2.2. Densité surfacique de courant	136
6.6.3. Reconstruction de sources	136
6.6.4. Utilisation de représentations spatiales en BCI	138
6.7. Représentation statistique des données	139
6.7.1. Analyse en composantes principales (ACP)	139
6.7.2. Analyse en composantes indépendantes (ACI)	139
6.7.3. Représentations statistiques pour le BCI	140
6.8. Contexte d'utilisation en BCI et conclusion	140
6.9. Bibliographie	141

Chapitre 7. Extraction de caractéristiques du signal EEG 145

Fabien LOTTE et Marco CONGEDO

7.1. Introduction	145
7.2. Extraction de caractéristiques	145
7.3. Extraction de caractéristiques pour les BCI exploitant l'activité oscillatoire	147
7.3.1. Conception basique d'une BCI exploitant l'activité oscillatoire	148
7.3.2. Vers des BCI plus avancées utilisant de multiples électrodes	148
7.3.2.1. Filtrage spatial	150
7.3.3. L'algorithme <i>Common Spatial Patterns</i>	151
7.3.4. Illustration sur de vraies données	153
7.4. Extraction de caractéristiques pour les BCI exploitant les potentiels évoqués	154
7.4.1. Filtrage spatial pour les BCI exploitant les potentiels évoqués	155
7.5. Méthodes alternatives et approche par géométrie riemannienne	156

7.6. Conclusion	158
7.7. Bibliographie	159

Chapitre 8. Analyse des enregistrements extracellulaires 161

Christophe POUZAT

8.1. Introduction	161
8.1.1. Pourquoi enregistrer des populations de neurones ?	161
8.1.2. Comment enregistre-t-on des populations de neurones ?	162
8.1.3. Les propriétés des données extracellulaires et la nécessité du tri des potentiels d'action	162
8.2. L'origine du signal et ses conséquences	164
8.2.1. Relation entre courant et potentiel pour un milieu homogène	164
8.2.2. Relation entre dérivées du potentiel membranaire et courant transmembranaire	165
8.2.3. « Des électrodes aux tétrodes »	168
8.3. Tri des potentiels d'action : présentation chronologique	169
8.3.1. Tri à l'œil	170
8.3.2. Discriminateur d'amplitudes (<i>window discriminator</i>) (1963)	170
8.3.3. Comparaison à des motifs standards (<i>template matching</i>) (1964)	171
8.3.4. Réduction de dimension (<i>dimension reduction</i>) et classification non supervisée (<i>clustering</i>) (1965)	172
8.3.5. Analyse en composantes principales (<i>principal components analysis</i>) (1968)	172
8.3.6. Résolution des superpositions (1972)	174
8.3.7. Dynamique d'amplitude des potentiels d'action (1973)	175
8.3.8. Filtres optimaux (1975)	176
8.3.9. Stéréodes et rapport d'amplitudes (1983)	178
8.3.10. La gigue électronique (<i>sampling jitter</i>) (1984)	182
8.3.11. Outils graphiques	183
8.3.12. Classification non-supervisée automatique	185
8.4. Quelques recommandations	191
8.5. Bibliographie	193

Chapitre 9. Apprentissage statistique pour les BCI 197

Rémi FLAMARY, Alain RAKOTOMAMONJY et Michèle SEBAG

9.1. Apprentissage statistique supervisé	197
9.1.1. Données d'apprentissage et fonction de prédiction	198
9.1.2. Risque empirique et régularisation	199
9.1.3. Méthodes de classification classiques	201

9.1.3.1. Analyse discriminante linéaire (LDA)	201
9.1.3.2. Séparateurs à vaste marge (SVM)	202
9.2. Méthodes d'apprentissage spécifiques	203
9.2.1. Sélection de variables et de capteurs	203
9.2.2. Apprentissage multisujet, transfert d'information	204
9.3. Mesures de performance	205
9.3.1. Mesure de performance pour la classification	205
9.3.2. Performance pour la régression	207
9.4. Validation et sélection de modèles	207
9.4.1. Estimation de la mesure de performance	208
9.4.1.1. Echantillonnage aléatoire	208
9.4.1.2. K-validation croisée et <i>leave-one-out</i> (LOO)	209
9.4.1.3. <i>Bootstrap</i>	209
9.4.2. Optimisation des hyper-paramètres	210
9.5. Conclusion	212
9.6. Bibliographie	212

TROISIÈME PARTIE. APPRENTISSAGE HUMAIN ET INTERACTION

HOMME-MACHINE	217
-------------------------	-----

Chapitre 10. Méthodes adaptatives en apprentissage machine . . . 219

Maureen CLERC, Emmanuel DAUCÉ et Jérémie MATTOU

10.1. Les principales sources de variabilité	219
10.1.1. La variabilité intra-individuelle	220
10.1.2. La variabilité inter-individuelle	221
10.2. Cadre de l'adaptation pour les interfaces cerveau-ordinateur	222
10.3. Décodage statistique adaptatif	223
10.3.1. Dérive de covariables	224
10.3.2. Adaptation du classifieur	225
10.3.2.1. Réapprentissage par fenêtre glissante	225
10.3.2.2. Descentes de gradient	226
10.3.3. Calibration adaptée au sujet	227
10.3.3.1. Apprentissage par renforcement	227
10.3.4. Tâche optimale	228
10.3.5. Correspondance entre tâche et commande	228
10.4. Modèle génératif et adaptation	229
10.4.1. Approche bayésienne	229
10.4.2. Décision séquentielle	232
10.4.3. Optimisation en ligne des stimulations	233
10.4.3.1. Expériences adaptatives en neurosciences cognitives	235

10.5. Conclusion	236
10.6. Bibliographie	236

Chapitre 11. Apprentissage humain pour les interfaces cerveau-ordinateur 241

Camille JEUNET, Fabien LOTTE et Bernard N'KAOUA

11.1. Introduction	241
11.2. Illustration : deux protocoles historiques en BCI	243
11.2.1. Principe du protocole de Graz	243
11.2.2. Principe du protocole du Wadworth Center pour le contrôle 1D de curseur	244
11.3. Limites des protocoles standards utilisés en BCI	245
11.4. Etat de l'art des protocoles d'apprentissage en BCI	246
11.4.1. Instructions	246
11.4.2. Tâches d'entraînement	246
11.4.3. Feedback	247
11.4.4. Environnement d'apprentissage	250
11.4.5. Pour résumer : quelques lignes directrices pour la création de protocoles d'apprentissage plus efficaces	250
11.5. Perspectives : vers des protocoles d'apprentissage <i>adaptés</i> et <i>adaptables</i> à l'utilisateur	251
11.6. Conclusion	254
11.7. Bibliographie	254

Chapitre 12. Interfaces cerveau-ordinateur pour l'interaction homme-machine 259

Andéol EVAÏN, Nicolas ROUSSEL, Géry CASIEZ, Ferran ARGELAGUET
et Anatole LÉCUYER

12.1. Une brève introduction à l'interaction homme-machine	259
12.1.1. Système interactif, interface et interaction	260
12.1.2. Tâches élémentaires et techniques d'interaction	260
12.1.3. Théorie de l'action, retours d'information	260
12.1.4. Utilisabilité	261
12.2. Caractéristiques des BCI, du point de vue de l'IHM	262
12.3. Quel motif pour quelle tâche ?	264
12.4. Paradigmes d'interaction pour les BCI	265
12.4.1. Boucle d'interaction BCI	265
12.4.2. Principaux paradigmes d'interaction pour les BCI	267
12.5. Conclusion	271
12.6. Bibliographie	272

Chapitre 13. Entraîner son cerveau avec le neurofeedback 277Lorraine PERRONNET, Anatole LÉCUYER, Fabien LOTTE, Maureen CLERC
et Christian BARILLOT

13.1. Introduction	277
13.2. Comment ça marche ?	280
13.2.1. Mise en place d'un programme d'entraînement par NF	280
13.2.2. Déroulement d'une séance de NF : les « yeux rivés » sur son cerveau	281
13.2.3. Un procédé d'apprentissage sur lequel il reste beaucoup à apprendre	282
13.3. Cinquante ans d'histoire	283
13.3.1. Un engouement trop précoce	283
13.3.2. Une diversification des approches	284
13.4. Vers un rapprochement entre NF et BCI	286
13.5. Applications	288
13.5.1. TDAH	289
13.5.2. Epilepsie	289
13.5.3. Dépression	290
13.5.4. Réhabilitation motrice suite à un accident vasculaire cérébral (AVC)	290
13.5.5. NF pour le contrôle d'une BCI	291
13.6. Conclusion	291
13.7. Bibliographie	292

Index 299**Sommaire du volume 2 305**