

---

collection dirigée par Jean-Claude Sabonnadière

---

# Centrales électriques et production alternative d'électricité

*les réseaux d'énergie électrique 3B*

Valentin Crastan

 hermes

Lavoisier

---

---

ECT 68 / Vol. 3B



049754  
e

# Centrales électriques et production alternative d'électricité

*les réseaux d'énergie électrique 3B*

Valentin Crastan

**Hermès**  
**Science**  
— publications —

*Lavoisier*

# Table des matières

|  |    |
|--|----|
| <b>Partie II Centrales électriques</b>                             |    |
| <b>Conversion de l'énergie</b> .....                               | 1  |
| <b>Chapitre 4. Centrales hydroélectriques</b> .....                | 3  |
| 4.1 Bases hydrologiques.....                                       | 3  |
| 4.2 Centrales au fil de l'eau.....                                 | 5  |
| 4.2.1 Aménagement des eaux.....                                    | 6  |
| 4.2.2 Exécution.....   | 6  |
| 4.2.3 Dimensionnement.....   | 8  |
| 4.3 Centrales à accumulation.....                                  | 8  |
| 4.3.1 Accumulation journalière et hebdomadaire.....                | 8  |
| 4.3.2 Accumulation annuelle (centrales saisonnières).....          | 10 |
| 4.3.3 Centrales de pompage-turbinage.....                          | 14 |
| 4.4 Turbines hydrauliques.....                                     | 15 |
| 4.4.1 Turbine Pelton.....  | 16 |
| 4.4.1.1 Diamètre du jet et débit.....                              | 18 |
| 4.4.1.2 Vitesse périphérique optimale.....                         | 19 |
| 4.4.1.3 Diamètre, nombre de tours spécifique.....                  | 19 |
| 4.4.2 Turbines à réaction.....                                     | 22 |
| 4.4.2.1 Phénomène de cavitation.....                               | 24 |
| 4.4.2.2 Diagramme des énergies.....                                | 25 |
| 4.4.2.3 Chiffres de débit et de pression.....                      | 25 |
| 4.4.2.4 Relations entre $n_q$ , $\varphi_i$ et $\psi$ .....        | 26 |
| 4.4.2.5 Dimensionnement de la turbine.....                         | 27 |
| 4.4.2.6 Types de turbines à réaction et types de pompes.....       | 30 |
| 4.4.3 Choix de la turbine.....                                     | 31 |
| 4.5 Dynamique.....   | 34 |
| 4.5.1 Galerie en pression.....                                     | 34 |
| 4.5.2 Chambre d'équilibre.....                                     | 36 |
| 4.5.3 Conduite forcée rigide.....                                  | 37 |
| 4.5.4 Modèle complet du système hydraulique.....                   | 38 |
| 4.5.4.1 Schéma fonctionnel non linéaire.....                       | 38 |
| 4.5.4.2 Fonction de transfert.....                                 | 38 |
| 4.5.5 Onde de pression élastique (coup de bélier).....             | 40 |
| 4.5.5.1 Modèles de la conduite forcée avec élasticité.....         | 41 |
| 4.5.5.2 Fonction de transfert de la conduite forcée élastique..... | 44 |

|  |   |           |
|--|---|-----------|
| 4.5.6  | Modèle complet du système hydraulique avec élasticité . . .     | 45        |
| 4.5.6.1  | Fonction de transfert. . . . .                                  | 45        |
| 4.5.6.2  | Schéma fonctionnel non linéaire. . . . .                        | 45        |
| 4.5.7  | Modèle de la turbine et de la centrale hydroélectrique. . . . . | 45        |
| 4.5.7.1  | Equations <i>per unit</i> (p.u.). . . . .                       | 46        |
| 4.5.7.2  | Linéarisation des équations de la turbine. . . . .              | 48        |
| 4.5.7.3  | Fonction de transfert de la turbine. . . . .                    | 50        |
| <b>Chapitre 5. Centrales thermoélectriques, thermopompe. . . . .</b> |   | <b>53</b> |
| 5.1  | Cycle de travail de la vapeur. . . . .                          | 53        |
| 5.1.1  | Cycles de Rankine et de Clausius-Rankine . . . . .              | 54        |
| 5.1.2  | Surchauffe intermédiaire et préchauffage de l'eau. . . . .      | 56        |
| 5.2  | Cycles des turbines à gaz. . . . .                              | 57        |
| 5.2.1  | Turbine à gaz à cycle ouvert (cycle de Joule). . . . .          | 57        |
| 5.2.1.1  | Cycle idéalisé. . . . .   | 58        |
| 5.2.1.2  | Cycle réel. . . . .   | 58        |
| 5.2.1.3  | Rendement, puissance. . . . .                                   | 61        |
| 5.2.2  | Récupération. . . . .   | 62        |
| 5.2.3  | Cycles à deux étages. . . . .                                   | 63        |
| 5.3  | Installations à cycle combiné. . . . .                          | 64        |
| 5.4  | Cogénération. . . . .   | 67        |
| 5.4.1  | Cogénération par soutirage de vapeur. . . . .                   | 67        |
| 5.4.2  | Cogénération par contre-pression. . . . .                       | 69        |
| 5.4.3  | Turbines à gaz. . . . .   | 70        |
| 5.4.4  | Petites centrales à énergie totale. . . . .                     | 71        |
| 5.4.5  | Cogénération et rejets de CO <sub>2</sub> . . . . .             | 71        |
| 5.5  | Centrales à vapeur à combustible fossile. . . . .               | 72        |
| 5.5.1  | Circuit air-combustible-fumées/cendres. . . . .                 | 72        |
| 5.5.2  | Circuit eau-vapeur, pertes. . . . .                             | 72        |
| 5.5.3  | Circuit de refroidissement. . . . .                             | 74        |
| 5.5.4  | Réglage de tranche (Heinrich Kleinen). . . . .                  | 76        |
| 5.5.5  | Dynamique. . . . .  | 79        |
| 5.6  | Centrales nucléaires. . . . .                                   | 82        |
| 5.6.1  | Energie provenant de la fission. . . . .                        | 82        |
| 5.6.1.1  | La fission de l'uranium. . . . .                                | 82        |
| 5.6.1.2  | Processus de conversion. . . . .                                | 84        |
| 5.6.2  | Types de réacteurs. . . . .                                     | 85        |
| 5.6.2.1  | Réacteurs à eau légère (PWR, BWR). . . . .                      | 85        |
| 5.6.2.2  | Réacteurs à eau lourde. . . . .                                 | 87        |
| 5.6.2.3  | Réacteurs modérés au graphite. . . . .                          | 88        |
| 5.6.2.4  | Réacteurs rapides surgénérateurs. . . . .                       | 88        |
| 5.6.3  | Cycle à vapeur et réglage. . . . .                              | 89        |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 5.6.4   | Sécurité et cycle du combustible. . . . .   | 89  |
| 5.6.4.1 | Sécurité du réacteur. . . . .   | 89  |
| 5.6.4.2 | Cycle du combustible et gestion des déchets. . . . .  | 89  |
| 5.6.5   | Les risques du nucléaire. . . . .   | 91  |
| 5.6.5.1 | Sécurité de la centrale . . . . .   | 92  |
| 5.6.5.2 | Cycle du combustible. . . . .   | 92  |
| 5.6.5.3 | Gestion des déchets. . . . .  | 93  |
| 5.6.5.4 | Armes nucléaires. . . . .   | 93  |
| 5.6.6   | Effets de la radioactivité. . . . .   | 94  |
| 5.6.6.1 | Activité. . . . .   | 95  |
| 5.6.6.2 | Dose de rayonnement absorbé. . . . .  | 95  |
| 5.6.6.3 | Dose équivalente. . . . .   | 95  |
| 5.6.6.4 | Radioactivité naturelle. . . . .  | 96  |
| 5.7     | Centrales à cycle combiné (Heinrich Kleinen). . . . .   | 97  |
| 5.7.1   | Centrales à cycle combiné proprement dit. . . . .   | 97  |
| 5.7.1.1 | Généralités. . . . .  | 97  |
| 5.7.1.2 | Exécution technique. . . . .  | 98  |
| 5.7.1.3 | Fonctionnement. . . . .   | 98  |
| 5.7.2   | Cycle combiné avec combustion auxiliaire dans la chaudière de récupération. . . . .   | 99  |
| 5.7.3   | Centrale à cycle combiné charbon/turbine à gaz avec récupération. . . . .   | 100 |
| 5.7.4   | Centrale à charbon combinée avec turbine à gaz dont les gaz d'échappement sont utilisés pour la combustion du charbon . . . . . | 100 |
| 5.7.5   | Centrales avec conversion du charbon sous pression. . . . .   | 101 |
| 5.7.6   | Comportement dynamique. . . . .   | 103 |
| 5.8     | La pompe à chaleur . . . . .  | 104 |
| 5.8.1   | Importance pour l'économie énergétique. . . . .   | 104 |
| 5.8.1.1 | Comparaison exergetique. . . . .  | 104 |
| 5.8.1.2 | Comparaison des degrés d'utilisation de l'énergie. . . . .  | 107 |
| 5.8.2   | Principe et structure de la thermopompe . . . . .   | 110 |
| 5.8.2.1 | Le cycle idéalisé. . . . .  | 110 |
| 5.8.2.2 | Le cycle réel. . . . .  | 112 |
| 5.8.2.3 | Efficacité énergétique. . . . .   | 114 |
| 5.8.3   | Applications. . . . .   | 114 |
| 5.8.3.1 | Aspects climatiques. . . . .  | 115 |
| 5.8.3.2 | Dimensionnement de la distribution de chaleur. . . . .  | 116 |

### Partie III Production alternative d'électricité. . . . . 119

#### Chapitre 6. Energie éolienne . . . . . 121

|       |                                      |     |
|-------|--------------------------------------|-----|
| 6.1   | L'énergie cinétique du vent. . . . . | 121 |
| 6.1.1 | Puissance théorique du vent. . . . . | 121 |
| 6.1.2 | Vitesse du vent. . . . .             | 122 |

|  |  |            |
|--|--|------------|
| 6.1.3  | Le potentiel énergétique.....                        | 123        |
| 6.1.4  | La distribution de Weibull.....                      | 124        |
| 6.2  | Types d'éoliennes et leur puissance.....             | 126        |
| 6.3  | Eoliennes à axe horizontal.....                      | 129        |
| 6.3.1  | Théorie de Betz.....                                 | 129        |
| 6.3.2  | Théorie de l'aile portante.....                      | 131        |
| 6.4  | Installations modernes à axe horizontal.....         | 133        |
| 6.5  | Autres types d'éoliennes.....                        | 134        |
| 6.5.1  | L'éolienne Darrieus.....                             | 134        |
| 6.5.1.1  | Géométrie du rotor.....                              | 134        |
| 6.5.1.2  | Forces agissant sur les éléments de la pale.....     | 136        |
| 6.5.1.3  | Théorie de l'aile portante.....                      | 137        |
| 6.5.2  | Le rotor Savonius.....                               | 138        |
| 6.5.2.1  | Structure.....                                       | 138        |
| 6.5.2.2  | Puissance fournie.....                               | 138        |
| 6.5.2.3  | Couple moteur.....                                   | 140        |
| 6.6  | Opération et réglage, conception de la centrale..... | 140        |
| 6.6.1  | Puissance et mode de fonctionnement.....             | 140        |
| 6.6.2  | Réglage de la puissance.....                         | 142        |
| 6.6.3  | Marche en parallèle avec le réseau.....              | 142        |
| 6.6.4  | Marche en îlot.....                                  | 143        |
| <b>Chapitre 7. Energie photovoltaïque.....</b> |  | <b>145</b> |
| 7.1  | Bases physiques, effet photoélectrique.....          | 145        |
| 7.1.1  | La photoconduction.....                              | 146        |
| 7.1.2  | La jonction P-N.....                                 | 148        |
| 7.2  | Effet photovoltaïque, courant photoélectrique.....   | 149        |
| 7.3  | Cellule solaire, rendement total.....                | 156        |
| 7.3.1  | Caractéristique et schéma équivalent.....            | 156        |
| 7.3.2  | Tension à vide.....                                  | 158        |
| 7.3.3  | Facteur de remplissage.....                          | 160        |
| 7.3.4  | Rendement global.....                                | 161        |
| 7.3.5  | Possibilités d'amélioration du rendement.....        | 162        |
| 7.3.6  | Types de cellules solaires.....                      | 163        |
| 7.4  | Le Soleil comme source d'énergie.....                | 165        |
| 7.4.1  | Intensité de rayonnement extraterrestre.....         | 165        |
| 7.4.2  | Mouvement apparent du Soleil autour de la Terre..... | 166        |
| 7.4.3  | Calcul de la position du Soleil.....                 | 169        |
| 7.4.4  | Calcul de l'intensité de rayonnement.....            | 169        |
| 7.4.5  | Energie de rayonnement journalière.....              | 171        |
| 7.4.6  | Effet de l'atmosphère.....                           | 173        |
| 7.4.7  | Intensité de rayonnement avec atmosphère.....        | 174        |



|   |  |            |
|---|--|------------|
| 7.5   | Systèmes photovoltaïques.....                            | 177        |
| 7.5.1   | Modules et générateurs solaires.....                     | 177        |
| 7.5.2   | Systèmes PV en îlot.....                                 | 177        |
| 7.5.3   | Installations PV couplées au réseau.....                 | 178        |
| 7.5.4   | Onduleur.....  | 179        |
| 7.5.5   | Modélisation des modules et générateurs solaires.....    | 181        |
| <b>Chapitre 8. Piles à combustible.....</b>       |  | <b>185</b> |
| 8.1   | Structure et types.....                                  | 185        |
| 8.2   | Principe et modèle.....                                  | 187        |
| 8.2.1   | Bases électro-chimiques.....                             | 187        |
| 8.2.2   | Modèle linéaire.....                                     | 189        |
| 8.3   | Piles à combustible pour applications stationnaires..... | 190        |
| 8.3.1   | Pile à combustible à l'acide phosphorique (PAFC).....    | 190        |
| 8.3.2   | Pile à combustible céramique (SOFC).....                 | 191        |
| 8.3.3   | Systèmes et centrales à pile à combustible.....          | 192        |
| <b>Chapitre 9. La fusion thermonucléaire.....</b> |  | <b>193</b> |
| 9.1   | Bases du processus de fusion.....                        | 193        |
| 9.1.1   | Réacteurs à fusion.....                                  | 193        |
| 9.1.2   | Distribution de l'énergie.....                           | 194        |
| 9.2   | Le réacteur à fusion.....                                | 195        |
| 9.2.1   | Principe du réacteur (d-t).....                          | 195        |
| 9.2.1.1   | Réaction de fusion dans le plasma.....                   | 197        |
| 9.2.1.2   | Réactions dans la couverture.....                        | 198        |
| 9.2.2   | Bilan énergétique du plasma.....                         | 198        |
| 9.2.3   | Le problème du confinement.....                          | 201        |
| 9.2.3.1   | Le confinement magnétique.....                           | 202        |
| 9.2.3.2   | Le confinement inertiel.....                             | 205        |
| 9.3   | Etat actuel et perspectives de la fusion nucléaire.....  | 205        |
| 9.3.1   | Programme international de recherche.....                | 205        |
| 9.3.2   | Avantages de la fusion, problèmes technologiques.....    | 206        |
| <b>Annexes.....</b>                               |  | <b>207</b> |
| <b>Annexe I Thermodynamique.....</b>              |  | <b>209</b> |
| I.1   | Notions de base.....                                     | 209        |
| I.1.1   | Grandeurs d'état.....                                    | 209        |
| I.1.2   | Transformations thermodynamiques.....                    | 210        |

|                   |   |            |
|-------------------|---|------------|
| <b>XII</b>        | <b>Les réseaux d'énergie électrique 3B</b>              |            |
| I.1.3             | Premier principe, bilan énergétique.....                | 211        |
| I.1.3.1           | Systèmes fermés.....                                    | 211        |
| I.1.3.2           | Ecoulements (systèmes ouverts).....                     | 212        |
| I.1.4             | Entropie, deuxième principe.....                        | 214        |
| I.2               | Cycles thermodynamiques.....                            | 215        |
| I.2.1             | Cycle de Carnot.....                                    | 215        |
| I.2.2             | Exergie, rendements.....                                | 216        |
| I.2.3             | Cycle thermodynamique général.....                      | 217        |
| I.3               | Transformations partielles.....                         | 218        |
| I.3.1             | Transformation isotherme.....                           | 218        |
| I.3.2             | Transformation isobare.....                             | 219        |
| I.3.3             | Transformation isochore.....                            | 219        |
| I.3.4             | Transformation adiabate.....                            | 220        |
| I.3.4.1           | Transformation isentrope (adiabate réversible).....     | 221        |
| I.3.4.2           | Transformation isoenthalpe (étranglement adiabate)..... | 221        |
| I.3.5             | Changement d'état polytrophe.....                       | 222        |
| I.4               | Cycles thermodynamiques techniques.....                 | 222        |
| <b>Annexe II</b>  | <b>Eléments de physique nucléaire.....</b>              | <b>225</b> |
| II.1              | Structure de l'atome et énergie de liaison.....         | 225        |
| II.2              | Isotopes.....   | 228        |
| II.3              | Radioactivité.....                                      | 229        |
| II.4              | Réactions nucléaires.....                               | 230        |
| II.5              | Section efficace et taux de réaction.....               | 230        |
| II.6              | La fission nucléaire.....                               | 232        |
| II.6.1            | La fission de l'uranium 235 ( $U^{235}$ ).....          | 232        |
| II.6.2            | Matières fissiles et matières fertiles.....             | 234        |
| <b>Annexe III</b> | <b>Fonction gamma.....</b>                              | <b>237</b> |
| <b>Annexe IV</b>  | <b>Diagramme de Mollier, fluides frigorigènes.....</b>  | <b>239</b> |
| <b>Annexe V</b>   | <b>Solutions des exercices.....</b>                     | <b>243</b> |
|                   | <b>Bibliographie.....</b>                               | <b>247</b> |
|                   | <b>Index.....</b>                                       | <b>251</b> |

*Les réseaux d'énergie électrique* présente des systèmes techniques complexes dont le comportement peut être prédit de façon fiable par des processus de simulation. Ces derniers sont aujourd'hui implémentés dans de courts délais grâce aux progrès des méthodes par ordinateur. C'est pourquoi l'ouvrage présente une modélisation rigoureuse de la dynamique de toutes les parties de l'installation.

La libéralisation du marché de l'énergie électrique et la forte concurrence qui l'accompagne conduisent les entreprises à exploiter les réseaux jusqu'à leurs limites.

Ce volume étudie les centrales classiques hydroélectriques et celles thermoélectriques à combustibles fossile et nucléaire. Il traite également des méthodes alternatives de production de courant électrique par les énergies éolienne et solaire, des perspectives de la fusion nucléaire et des piles à combustible.

#### *L'auteur*

Ingénieur de recherche et de développement, Valentin Crastan a été professeur de technique et doyen de la division électrotechnique à la Haute école spécialisée bernoise (Bienne, Suisse). Il est actuellement ingénieur-conseil dans le domaine de l'énergie.

**Hermès**  
**Science**  
— publications —

[www.hermes-science.com](http://www.hermes-science.com)

978-2-7462-2340-0

