

Préface

Le sous-titre de cet ouvrage fait état d'« énergies renouvelables » et c'est d'abord à ce titre que je fus sollicité par Mathieu Mory pour écrire cette préface. Ma vie professionnelle s'est majoritairement déroulée au Laboratoire des écoulements géophysiques et industriels (LEGI) qui est une Unité mixte de recherche (UMR 5519) du Centre national de la recherche scientifique (CNRS), de l'Institut national polytechnique de Grenoble (Grenoble INP) et de l'Université Grenoble-Alpes (UGA). C'est dans ce laboratoire que je lançai en l'an 2000 un programme de recherches, fédérant pendant une dizaine d'années quatre laboratoires régionaux, dont l'objectif était de concevoir et de réaliser *in fine* un démonstrateur d'une hydrolienne marine innovante. Ce programme fut à l'origine de la société HydroQuest dont une hydrolienne est mentionnée dans cet ouvrage. Je n'ai cessé depuis d'être impliqué dans les énergies renouvelables à travers d'abord plusieurs études sur de nouveaux convertisseurs, et parallèlement en participant à divers organismes nationaux, comme le groupe n° 5 sur les Énergies marines, hydrauliques et éoliennes de l'Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie (ANCRE) et comme le Comité d'évaluation scientifique CES 05 – Une énergie durable, propre, sûre et efficace de l'Agence nationale de la recherche (ANR).

Le présent ouvrage est original à plusieurs égards.

Tout d'abord par son angle d'attaque sur les énergies renouvelables qui sont limitées aux énergies hydraulique et éolienne, c'est-à-dire issues de l'eau et du vent respectivement ; les trois autres formes communément admises étant ainsi non considérées, à savoir les énergies solaire, biomasse et géothermique, issues du soleil de la biomasse ou de la terre. La limitation originale apparaît en fait dans le titre lui-même qui précise implicitement que seule la conversion mécanique sera considérée dans la chaîne de conversion des différentes filières abordées ; ainsi la partie de la chaîne prise en compte s'étend de la ressource primaire disponible dans la nature et s'arrête à l'amont des générateurs

électriques. En revanche, cette partie est très soigneusement traitée, étape par étape, composant par composant, certains de ces derniers pouvant éventuellement ne pas être mécaniques : thermiques dans l'énergie thermique des mers ou chimiques dans les convertisseurs d'énergie osmotique. On notera que le découpage en chapitres couvre la filière éolienne (chapitre 3) et les six filières de l'énergie hydraulique (chapitres 4 à 8). Le découpage est classique, si ce n'est que le chapitre 4 consacré à l'énergie marémotrice traite à la fois la filière des barrages marémoteurs et la filière des hydroliennes marines.

Un autre aspect original est l'introduction d'un état des lieux, conduit avec mesure, pour chaque filière considérée, figurant soit au début du chapitre concerné, soit à la fin. Cet état des lieux n'est pas sans intérêt pour les étudiants qui à la fin de leurs études désirent soit intégrer une entreprise, soit s'engager dans une thèse pour développer une des filières des énergies renouvelables ici considérées. Ils peuvent se sentir incités par des médias qui n'ont pas toujours le recul nécessaire pour juger de la maturité des différentes filières ici abordées, ni de l'importance des obstacles à surmonter pour obtenir des coûts acceptables. L'enthousiasme qui en résulte est certes éminemment positif pour la décarbonation de notre planète, mais il doit être canalisé pour s'accorder vraiment aux attentes de ces étudiants, afin qu'ils ne soient pas déçus. Pour chaque filière, il est souhaitable qu'ils puissent *a priori* replacer dans un contexte général les objectifs qui leur seront proposés, connaître la part des exigences proprement techniques ou économiques à lever que l'innovation permet en priorité de surmonter, et la part des exigences scientifiques de nature plus fondamentale pour optimiser des filières qui commencent à être bien connues et exploitées.

Dernier aspect original et certainement le plus important : l'approche utilisée pour transférer l'information transmise au fil des chapitres relevant d'une pédagogie que l'on peut qualifier de participative. La succession des exercices fournis dans chaque filière dans cet ouvrage, exercices qui se décomposent en une succession de questions, suivie de la succession des réponses correspondantes, invite les étudiants à penser par eux-mêmes, à découvrir de manière autonome. Ces exercices relèvent de situations tirées d'applications bien décrites qui deviennent signifiantes pour eux ; ils se situent en quelque sorte sur un pont entre des énoncés de problèmes très théoriques et abstraits et des énoncés de problématiques comportant des détails trop techniques. Lesdits exercices sont enfin pertinents sans être trop complexes : ils ne nécessitent pas d'approches numériques élaborées. On peut imaginer qu'ils sont eux-mêmes le fruit d'expériences, de tâtonnements, issus des cours magistraux, et des séances d'exercices proposés par l'auteur à ses élèves.

Pour terminer, je voudrais indiquer les raisons pour lesquelles j'acceptai d'écrire cette préface pour cet ouvrage. Mathieu Mory est un ami que je connais depuis 1982 et j'en connais les nombreuses qualités. Je me garderais bien toutefois d'en faire un panégyrique, mais je veux simplement communiquer le mot qui me vient à l'esprit quand je

pense à lui. Ce mot est rigueur, rigueur morale tout autant qu'intellectuelle. Cette rigueur explique sa trajectoire professionnelle depuis sa sortie de l'école Polytechnique. On lui proposa alors un poste de responsabilités élevées dans un service R&D d'une importante entreprise, qu'il refusa en raison d'une connaissance qu'il jugea alors insuffisante des activités technico-scientifiques de ce service. C'est ainsi qu'il choisit et poursuivit une carrière universitaire dans laquelle l'enseignement ne fut jamais dédaigné au profit d'une activité de recherches qui resta de haut niveau. Cet ouvrage en est un peu l'illustration.

Jean-Luc ACHARD
Directeur de recherche émérite au CNRS

Introduction

Présentation de l'ouvrage

Cet ouvrage aborde la conversion mécanique en proposant une série d'exercices et en présentant leurs solutions. Ce sont d'une façon générale des exercices de dimensionnement. Ils mettent en œuvre des méthodes qui déterminent les caractéristiques et les dimensions des installations et des machines qui, pour les différents procédés étudiés, fournissent une puissance ou une quantité d'énergie voulues.

Les domaines d'application touchent une variété d'énergies marines : énergies marémotrice et hydrolienne, énergie des vagues, énergie thermique de la mer, énergie osmotique. Ils incluent aussi l'énergie éolienne et l'hydroélectricité. Les différents domaines d'application sont abordés dans des chapitres séparés. Pour chaque type d'énergie, la ressource énergétique est décrite, un procédé pour la récupérer est présenté et son dimensionnement est effectué pour un objectif de production fixé.

Proposer un exercice est une facilité par rapport à la situation réelle à laquelle l'ingénieur est confronté. On n'est pas tenu de se plier aux contraintes d'un site ou d'une situation réelle. Néanmoins, les conditions des exercices proposés n'ont pas été choisies par hasard. Pour nombre d'entre eux, nous avons en vue une installation précise et, en retour, il était parfois possible de comparer les dimensionnements effectués à des données connues sur ces installations. Les installations de référence sont nommées lorsqu'elles ont servi à élaborer un exercice. L'information disponible est souvent parcellaire ou incomplète. Considérer le dimensionnement comme un exercice permet de garder une distance avec une situation trop partiellement connue. Ce faisant, l'exercice permet de se focaliser sur les principes de la conversion mécanique qui constituent l'objet de cet ouvrage.

La discipline scientifique dont relèvent ces exercices est principalement la mécanique des fluides. C'est pourquoi le chapitre 1 propose des rappels en mécanique des fluides. Il doit se voir comme un mémento plutôt qu'un cours. Le lecteur devra se reporter à des ouvrages de mécanique des fluides pour lire les démonstrations manquantes. Il disposera en revanche, avec ce chapitre, des éléments nécessaires à la résolution des exercices. Le chapitre 2 présente des rappels de cours sur les turbomachines hydrauliques. Deux exercices sont inclus dans ce chapitre. D'autres exercices relevant directement des méthodes exposées dans le chapitre 2 sont trouvés dans les chapitres suivants, consacrés à l'énergie éolienne, à l'hydroélectricité ou à l'énergie des marées.

Les domaines d'application des exercices relèvent des énergies renouvelables. C'est pourquoi le terme *énergies renouvelables* apparaît dans le sous-titre de cet ouvrage. Pour chaque secteur, un court état des lieux est dressé dans le chapitre qui lui est consacré. L'objectif est que le lecteur connaisse le degré de maturité et qu'il ait la notion des puissances et énergies délivrées par les installations aujourd'hui construites. Certains de ces secteurs sont en évolution rapide. Les chiffres indiqués sont ceux connus au moment de la parution de cet ouvrage. Ils peuvent vite devenir obsolètes. C'est la raison pour laquelle cet état des lieux reste succinct. Là n'est pas l'objectif de cet ouvrage qui veut contribuer à l'acquisition de méthodes de dimensionnement. Le lecteur trouvera un état des lieux à jour d'une filière dans les rapports publiés en France par le Syndicat des énergies renouvelables¹ ou par l'ADEME.

Le fonctionnement des installations de production d'électricité étudiées dans cet ouvrage, qui utilisent les énergies renouvelables, ne produit pas de CO₂. Néanmoins, la fabrication des équipements nécessaires au fonctionnement des usines met en jeu des procédés qui en eux-mêmes sont émetteurs de CO₂. Une analyse du cycle de vie des installations est nécessaire pour établir le véritable bilan carbone de ces unités. Cet aspect n'est pas abordé dans cet ouvrage.

Puissance, énergie, facteur de charge

Les données énergétiques sont quantifiées par l'énergie et la puissance. La puissance est l'énergie par unité de temps. En régime permanent, si un système énergétique délivre une puissance \wp maintenue constante, l'énergie transférée pendant une durée T se calcule par la formule $E = \wp T$.

1. « Panorama de l'électricité renouvelable au 30 juin 2021 », publication du Syndicat des énergies renouvelables. Ces publications sont annuelles.

En système d'unité international, la puissance se mesure en Watt (W). Le Watt se traduit en unités internationales (kg, m, s) selon :

$$1 W = 1 kg m^2 s^{-3}$$

L'énergie se mesure en Joule (J), avec l'équivalence en unités (kg, m, s) :

$$1 J = 1 kg m^2 s^{-2}$$

Les données énergétiques varient sur de vastes intervalles. C'est pourquoi on emploie couramment le kiloW ($1 kW = 10^3 W$), le MégaW ($1 MW = 10^6 W$), le GigaW ($1 GW = 10^9 W$) et le TéraW ($1 TW = 10^{12} W$).

Pour quantifier l'énergie, on utilise aussi le kWh. Un Wh est l'énergie délivrée pendant une heure par un système dont la puissance est de 1W. Par conséquent :

$$1 Wh = 3600 J$$

De la même façon, $1 kWh = 10^3 Wh$, $1 MWh = 10^6 Wh$, $1 GWh = 10^9 Wh$, $1 TWh = 10^{12} Wh$.

Pour apprécier un système énergétique, il est nécessaire de connaître à la fois sa puissance et l'énergie délivrée pendant une période de référence. Si, par exemple, on connaît la puissance nominale d'une usine hydroélectrique $\wp = 50 MW$ et l'énergie qu'elle produit en une année $E = 200 GWh$, ces deux informations nous indiquent que l'installation a fourni en une année l'énergie comme si elle avait fonctionné à son régime nominal pendant la durée :

$$T = \frac{E}{\wp} = 4000 \text{ heures}$$

L'unité de temps du résultat est la seconde si l'énergie et la puissance sont données en J et en W. Elle est en heure si l'énergie et la puissance sont données en Wh et en W.

Une année compte 8 760 heures. Une durée de fonctionnement à puissance nominale de 4 000 heures signifie que l'installation a fonctionné à puissance nominale pendant 46 % de la durée d'une année. On utilise le facteur de charge :

$$f = \frac{E}{\wp T_{\text{année}}}$$

pour apprécier l'usage d'une installation. $T_{\text{année}}$ est la durée d'une année, exprimée dans l'unité correspondant aux unités utilisées pour exprimer puissance et énergie. On comprend aisément qu'il est économiquement plus avantageux de concevoir une installation

de plus faible puissance si le facteur de charge est trop faible du fait d'une ressource énergétique limitée. Il est possible de faire un choix de cette nature pour une installation hydroélectrique. En revanche, pour l'énergie éolienne par exemple, le facteur de charge est fixé par les conditions de vent, aléatoires par nature.

Les puissances et énergies varient considérablement selon la taille des systèmes que l'on considère. Il est essentiel d'avoir en tête quelques ordres de grandeurs pour juger la pertinence d'un dimensionnement.

Puissance	
Ampoule électrique d'éclairage d'une pièce d'habitation	10 à 100 W
Champion cycliste	400 W
Machine électroménager (lave-linge, lave-vaisselle)	1 kW
Puissance électrique maximale fournie dans une habitation	4 à 6 kW
Puissance fournie par une éolienne terrestre	1 MW
Puissance d'une tranche de centrale nucléaire	900 à 1 300 MW
Record de consommation électrique en France	100 000 MW
Énergie	
Consommation électrique d'une famille en France	10 000 kWh
Consommation électrique annuelle de la France	500 TWh
Pouvoir calorifique d'un litre d'essence	10 kWh
Consommation d'une voiture à moteur thermique pour 100 km parcourus	50 à 100 kWh
Consommation d'une voiture électrique pour 100 km parcourus ²	25 kWh
Prix TTC de l'électricité en France pour la consommation domestique (incluant consommation et abonnement) ³	0,19 € par kWh, 190 € par MWh

Tableau I.1. Ordres de grandeur de puissances et énergies

Le tableau I.1 indique des ordres de grandeur de puissance et d'énergie. Les données présentées sont essentiellement des données de consommation. Sur le plan de la production, seules la puissance d'une éolienne terrestre et la puissance d'une tranche de centrale nucléaire figurent dans le tableau. Des chiffres plus précis sur la production sont fournis

2. Il ne faut pas conclure de ces chiffres un avantage définitif de la voiture électrique par rapport à la voiture thermique. Cela dépend du mode de production de l'électricité qui alimente le véhicule électrique. Le rendement d'un moteur à explosion varie entre 30 et 50 % environ.

3. Donnée Eurostat pour l'année 2020.

dans les chapitres de cet ouvrage pour les différentes technologies étudiées. Le tableau I.1 indique également l'ordre de grandeur du prix de l'électricité domestique. C'est un prix qui inclut la distribution, les taxes et la TVA. Il diffère bien évidemment des prix de négociation de l'électricité entre producteurs et distributeurs qui varient en fonction de l'offre et de la demande.

Les sources de cet ouvrage

Le contenu de cet ouvrage a été élaboré dans le cadre de l'enseignement dispensé par son auteur au sein du master international Simulation and Optimization of Energy Systems (master SIMOS) délivré au sein de l'École nationale supérieure en génie des technologies industrielles, école d'ingénieurs appartenant à l'Université de Pau et des Pays de l'Adour.

Ce master mettant l'accent sur l'optimisation énergétique, on retrouve dans de nombreux exercices de cet ouvrage un point de vue d'optimisation pour dimensionner les équipements.

La démarche pédagogique de cet ouvrage est construite autour des exercices et de leur résolution. L'auteur est conscient que les bases théoriques exposées dans les chapitres 1 et 2 seront indigestes pour certains lecteurs. Il n'a pas voulu pour autant les développer davantage. Cet ouvrage n'est pas un livre de cours. Il suggère au lecteur d'aborder directement la résolution des exercices pour venir progressivement sur la théorie et maîtriser sa mise en œuvre par des aller-retours entre les exercices et les parties théoriques.

La conversion d'énergie

L'énergie se présente sous plusieurs formes : énergie électrique, énergie thermique, énergie mécanique, énergie chimique, etc. Convertir l'énergie signifie que l'on change une forme d'énergie en une autre. L'accent est mis dans cet ouvrage sur la conversion mécanique. Différentes formes d'énergie mécanique apparaissent dans cet ouvrage. L'énergie mécanique d'un solide en rotation, comme un rotor, est une énergie cinétique. L'énergie mécanique d'un fluide est quantifiée par sa charge :

$$H = p + \rho \frac{\vec{u} \cdot \vec{u}}{2} + \rho g z$$

où interviennent la pression p , l'énergie cinétique (dépendant de la vitesse \vec{u} et la masse volumique ρ) et l'énergie potentielle ($g = 9,81 m \cdot s^{-2}$ est l'accélération de la gravité et z désigne l'altitude). La charge est habituellement évaluée en unité de pression (le

Pascal, Pa). Il est important d'avoir en tête que la charge est une énergie par unité de volume ($1 Pa = 1 J/m^3$).

Dans les exercices traités, on verra de nombreux types de conversion mécanique entre ces différentes formes d'énergie.

La puissance associée à une force \vec{F} appliquée sur un solide qui le fait se déplacer à la vitesse \vec{u} est :

$$\mathcal{P} = \vec{F} \cdot \vec{u}$$

De même, la puissance associée à un rotor sur lequel on applique un couple C et qui tourne à la vitesse angulaire ω est :

$$\mathcal{P} = C \cdot \omega$$

Enfin de façon similaire, on considère un volume V contenant un fluide. En régime permanent, pour un fluide incompressible et un écoulement isotherme, le débit volumique Q entrant dans le volume doit être compensé par un même débit de fluide sortant du volume. La puissance nécessaire pour maintenir cet écoulement est le débit multiplié par la variation de charge entre l'entrée et la sortie du volume :

$$\mathcal{P} = \Delta H \cdot Q$$

L'objet n'est pas d'entrer ici dans le détail de ces équations mais de souligner leur similitude. Pour un solide ponctuel, la puissance est un compromis entre force et vitesse. Il n'y a pas de puissance sans vitesse ni force. Pour un rotor tournant, la puissance est un compromis entre vitesse de rotation et couple. Pour un fluide en écoulement permanent, la puissance est un compromis entre débit et variation de charge.

Cette notion de compromis est naturellement ressentie par le cycliste pédalant sur son vélo. Pour fournir une puissance dans la mesure de ses capacités, il va choisir le pignon approprié pour se sentir à l'aise en termes de vitesse de rotation et de couple à appliquer sur le pédalier.

S'il y a un lien commun entre tous les problèmes traités dans cet ouvrage, c'est celui de trouver le compromis adéquat entre force et vitesse, couple et vitesse de rotation, charge et débit. Tous les exercices de cet ouvrage, en définitive, traitent de cette même question.