

Préface

C'est une belle aventure que Frédéric Aitken et Jean-Numa Foule ont entreprise : exploiter les données physiques de l'expédition *Challenger*, première expédition océanographique d'envergure, commanditée par l'Amirauté britannique dans les années 1870. En effet, ces données, relevés de température et de pression à diverses profondeurs et en de multiples points du globe, avaient été relativement peu exploitées à l'époque malgré l'intuition visionnaire de l'un des initiateurs de l'expédition, le professeur Carpenter, que ces données permettraient de reconstituer la circulation océanique. Les auteurs attribuent ce relatif désintérêt à ce que la plupart des scientifiques de l'expédition étaient des naturalistes, et que du point de vue de la biologie, la somme de retombées était déjà énorme, avec, par exemple, la découverte de la vie à très grande profondeur.

Exploiter des données n'est pas la moins intéressante des tâches du physicien. On simplifie la situation, pour arriver à traiter le problème, en essayant de ne rien supprimer d'essentiel. On évalue les termes des équations, pour ne garder que les plus importants, et, ensuite, deux situations peuvent se présenter. Soit le désaccord avec les données est manifeste : on se convainc en général qu'on a trop simplifié, mais où ? On est tenté par la mauvaise foi, pour défendre son idée, quitte à se faire ensuite l'avocat du diable, et détruire ce que l'on avait construit. On reprend un à un les termes négligés, et, avec un peu de chance, cela peut déboucher sur un effet nouveau. On fait avec ce que l'on sait, la bataille est rude, et c'est ce qui fait son attrait.

Soit l'accord est acceptable. C'est là que le bon physicien se méfie : n'est-ce pas une coïncidence, deux effets importants ne se compensent-ils pas par hasard ? Il faudrait faire une prédiction, et recommencer l'expérience dans des conditions différentes, mais ce n'est pas toujours possible. On ne relance pas aussitôt un bateau et 200 personnes autour du monde pour trois ans ! La rigueur avec laquelle les expériences ont été menées, la confiance que l'on peut accorder aux mesures, sont alors essentielles. Les expérimentateurs ont dû multiplier les situations en aveugle, sans savoir lesquelles serviraient

de test auxquelles, avec pour seul souci de faire de leur mieux à chaque fois, en décrivant bien leur protocole pour l'exploitation future.

La mise au point du protocole de mesure fait partie de la conception de l'expérience. La construction des instruments aussi. À cette époque, un physicien digne de ce nom n'aurait jamais utilisé un instrument qu'il ne savait pas construire. Comment d'ailleurs mesurer une température à un endroit que l'on ne peut pas atteindre soi-même (2 000 m sous la surface de la mer par exemple) ? On peut enregistrer les températures maximales et minimales atteintes lors de la descente (j'ai retrouvé avec émotion la description du thermomètre à maxima et minima que mon grand-père utilisait dans son jardin). Mais que faire pour les températures intermédiaires ? Comment faire pour que la ligne ne casse pas par gros temps sous les à-coups du bateau ? Comment décider de la vraie profondeur malgré les courants, et le fait que la ligne continue à se dérouler sous son propre poids une fois la sonde au fond ? La phase de conception de l'expérience peut être passionnante : j'ai connu un physicien qui était prêt à saboter une expérience à peine construite (sous prétexte, bien sûr, de l'améliorer) pour pouvoir passer plus rapidement à la conception de l'expérience suivante.

Malgré tout le soin apporté à la conception, il arrive que l'on soupçonne une erreur dans les mesures. C'est le cas ici. Ayant atteint des profondeurs inattendues (ils ont découvert la fosse des Mariannes), les scientifiques du *Challenger* se sont demandé si la contraction des enveloppes de verre n'avait pas faussé leurs mesures. Après leur retour, ils ont donc confié à un physicien d'Édimbourg, Peter Tait, la tâche d'évaluer ces erreurs. De fil en aiguille, celui-ci en est arrivé à se poser des questions sur la compressibilité de l'eau de mer, et d'autres liquides, et donc à leur équation d'état, reliant pression, température et densité (et même salinité). Le résultat de ses études a marqué durablement la physique des liquides. Comme quoi, l'estimation des erreurs, tâche détestée et méprisée par l'étudiant en physique moyen, a débouché sur des connaissances nouvelles.

Contemporains de l'équation de van der Waals, les efforts de Tait font partie des premiers essais pour représenter l'équation d'état des corps denses, liquides et solides par des fonctions continues. Le but est double. Métrologique, pour interpoler entre les résultats expérimentaux, et fournir aux expérimentateurs et aux ingénieurs une caractérisation la plus précise possible des propriétés thermodynamiques et physiques des fluides qu'ils sont amenés à utiliser. Mais aussi plus fondamental, en ceci que l'on souhaite en tirer une compréhension accrue des mécanismes physiques sous-jacents : formation d'agrégats moléculaires, ordre cristallin local, forme des potentiels d'interaction, etc. Ces deux soucis sont souvent en conflit, entre pragmatisme et rigueur, comme il apparaît bien dans le récit des auteurs, qui vont jusqu'à appliquer les idées

de l'époque à des fluides dont il n'était pas question alors, les phases fluides des deux isotopes stables de l'hélium.

Baucoup des aspects de cette aventure scientifique sont donc universels, et il est émouvant de voir comme les codes de valeur de l'approche scientifique se sont transmis au cours des décennies, presque des siècles. Mais notre recul dans le temps nous donne un avantage : celui de pouvoir juger les idées d'alors à la lumière de l'extraordinaire somme de connaissances qui a été accumulée depuis. Cependant, une comparaison directe serait injuste et maladroite. Il est bien plus intéressant de nous replonger dans l'état d'esprit des acteurs de cette époque, de partager leurs doutes, leurs hésitations, leurs erreurs même. C'est un aspect qui est trop souvent absent de notre enseignement. Par souci d'efficacité, on passe sous silence des idées brillantes, mais qui ont débouché sur une impasse. Pourtant ces idées peuvent se retrouver fécondes ailleurs. Voir hésiter des grands noms comme Clausius, Joule, van der Waals nous remplit d'humilité devant la maîtrise qui leur a permis de retrouver le bon chemin, mais aussi de confiance devant nos propres hésitations. La variété d'acteurs et de points de vue qui ont jalonné cette époque montre bien aussi à quel point la science est une aventure collective.

C'est tout cela que j'ai retrouvé dans cet ouvrage de Frédéric Aitken et Jean-Numa Foulc, et plus encore, comme l'aventure humaine qu'a été ce voyage de trois ans autour du globe, ses incidents, ses drames, ses joies, ce qu'elle a révélé de la personnalité de chaque participant, dont la vie, pour certains, est d'ailleurs décrite, le relais émouvant qui est transmis quand un changement d'affectation, ou pire, la mort, oblige à interrompre sa tâche. On y trouve aussi l'accueil réservé à l'expédition, parfois idyllique (ah ! la difficulté de quitter Tahiti), parfois plus froid, l'importance de la fanfare et des talents personnels des participants, sans compter la providence qu'a représentée le *Challenger* pour ces Robinsons, abandonnés sur une île par un bateau qui n'a pu revenir les chercher. À la lecture du récit basé sur le journal de bord, comment ne pas évoquer les romans de Jules Verne ? L'époque est la même, celle d'une soif de connaissances sur notre environnement, accessibles à chacun d'entre nous, acquises par de véritables aventuriers pourtant si humains, si proches de nous. Il est tout à l'honneur des auteurs d'avoir consacré tant de temps, d'énergie et d'enthousiasme à cette œuvre humaniste et complète, bien dans l'esprit de ce laboratoire où j'avais plaisir à venir discuter, lors de mes années grenobloises.

Bernard CASTAING
Membre de l'Académie des sciences

Avant-propos

En mai 1876, l'expédition océanographique du H.M.S *Challenger* rejoint l'Angleterre après avoir sillonné pendant plus de trois ans les mers du globe. Les principaux objectifs de cette croisière pionnière étaient d'étudier la vie animale en profondeur, de sonder le fond des océans en vue d'améliorer la connaissance des reliefs sous-marins et d'observer les propriétés physiques de l'océan profond afin d'établir le lien entre les courants et les températures océaniques. Ce dernier point a été proposé par le naturaliste William Carpenter, un des promoteurs de l'expédition du *Challenger*. Toutefois, si les travaux sur la vie animale ont été amplement mis en valeur après l'expédition, il n'en a pas été de même pour les observations physiques accumulées tout au long du voyage car les connaissances théoriques en dynamique des océans étaient alors quasi inexistantes.

Pourtant, dès 1870, un des initiateurs de l'expédition du *Challenger*, le naturaliste William Carpenter avait émis l'idée que la circulation océanique pourrait être reconstituée à partir des profils de température de l'eau en fonction de la profondeur. Un des enjeux de l'ouvrage est précisément de montrer que les mesures collectées par les scientifiques du *Challenger* portaient en germe toutes les données nécessaires pour établir le lien entre les courants et les températures océaniques.

Un autre personnage eut une intervention décisive après le retour du *Challenger*. Il s'agit du physicien Peter Tait qui fut sollicité par le responsable scientifique de l'expédition pour résoudre une épineuse question portant sur l'évaluation de l'erreur de mesure de température engendrée par la forte pression à laquelle étaient soumis les thermomètres. Peter Tait utilisa à cette occasion une nouvelle enceinte haute pression qui lui permit de déterminer avec précision la correction à apporter sur les mesures de température amassées par le *Challenger* et de se lancer dans des études plus fondamentales sur la compressibilité des liquides et des solides qui l'amènèrent neuf ans plus

tard à formuler sa célèbre équation d'état. L'analyse des propriétés de compressibilité des liquides constitue le deuxième enjeu de cet exposé.

Des profondeurs océaniques au laboratoire est composé de trois volumes. Le premier volume relate l'expédition du H.M.S. *Challenger* et aborde la problématique de la mesure des grandes profondeurs. Les deuxième et troisième volumes proposent un exposé plus scientifique qui reprend et développe les deux points évoqués précédemment : la corrélation entre la distribution de la température et les courants océaniques (volume 2) et les propriétés de compressibilité de l'eau de mer, et plus généralement, de celle des liquides (volume 3).

Présentation du volume 2

Le chapitre 1 commence par un historique des techniques de mesure de la température des eaux océaniques et apporte quelques précisions sur les thermomètres Miller-Casella utilisés lors de l'expédition du *Challenger*. Le deuxième point abordé concerne les erreurs de mesure de température dues aux fortes pressions rencontrées dans les abysses. L'origine de ces erreurs et les premières conclusions des travaux de Peter Tait pour y remédier sont exposées.

Le chapitre 2 souligne le lien entre la distribution de la température et la circulation océanique. Après avoir décrit brièvement la stratification de l'océan en plusieurs couches, les éléments de base conduisant à la modélisation des écoulements internes géostrophiques sont rappelés. Le chapitre se poursuit par une présentation plus générale de l'effet de la latitude sur la vorticité planétaire et sur le transport des masses d'eau donné par la relation de Sverdrup.

Le chapitre 3 développe une modélisation simplifiée de la thermocline prenant en compte les aspects thermiques et mécaniques. La résolution de la thermocline (expressions donnant la température au sommet en fonction de la latitude et de la longitude et les vitesses verticales au sommet et à la base) est discutée et traitée dans divers cas d'hypothèses. Les mesures de température prélevées lors de l'expédition du *Challenger* sont utilisées pour déterminer une échelle d'enfoncement caractéristique de la thermocline, moyenne (commune aux trois océans) et symétrique (valable pour les deux hémisphères), en fonction de la latitude.

Le chapitre 4 propose une vue d'ensemble de la circulation océanique associant les interactions entre la couche interne en équilibre géostrophique et les couches adjacentes : couche superficielle CMO (soumise à l'action du vent), couche de fond et couches latérales (bordures continentales). Des comparaisons entre des modèles théoriques de circulation océanique et de thermocline, et entre des résultats issus des modèles et

des mesures de température du *Challenger* sont montrées et commentées. Le chapitre se poursuit par la prise en compte des effets saisonniers sur la fluctuation de la thermocline (stabilité des couches supérieures, exemples de thermoclines saisonnières) et par l'examen de la distribution de la température dans les régions polaires (absence de thermocline, effet de la glace de mer). Le chapitre se termine par une présentation de la circulation océanique globale prenant en compte les fluctuations locales de température et de salinité (circulation thermohaline).

Résumé des volumes 1 et 3

Le volume 1 présente le contexte, l'organisation et le déroulement de l'expédition du H.M.S. *Challenger*. Le récit détaillé de la croisière est agrémenté par de nombreuses illustrations (cartes, photographies, etc.) rarement présentées. Le rôle déterminant des officiers et des scientifiques ayant participé à cette croisière est souligné et une brève biographie de chacun d'eux est proposée. Nous abordons également dans ce premier volume la problématique de sondage à grande profondeur qui constituait à l'époque une opération délicate et pas toujours bien maîtrisée. Une approche théorique de la vitesse d'immersion d'une sonde est proposée et mise en regard avec l'expérience. Nous terminons par une présentation de quelques résultats de relevés bathymétriques et d'observations physiques effectués par les scientifiques du *Challenger*. Les relevés bathymétriques sont mis à profit pour représenter des reliefs sous-marins typiques et connus (fosse des Mariannes, dorsales Sud-Atlantique, etc.) et les observations physiques apparaissent sous la forme de températures, de salinités et de masses volumiques en fonction de la profondeur.

Le volume 3 commence par un rappel de la notion de compressibilité et des coefficients qui lui sont rattachés. Nous présentons ensuite un historique détaillé des techniques de mesure de la compressibilité des liquides. Ceci nous amène tout naturellement aux travaux de Tait engagés dès 1879 sur la mesure de la compressibilité de l'eau douce, de l'eau de mer, du mercure et du verre et à son équation d'état paramétrée avec deux grandeurs. Les évolutions et les interprétations physiques des paramètres de l'équation de Tait, ainsi que celles associées à l'équation de Tait-Tammann, sont étudiées par comparaison ou analogie avec quelques équations d'état classiques dont principalement celle de van der Waals, afin d'obtenir une certaine image de la « structure » des milieux liquides. L'étude approfondie du module mixte isotherme puis du module tangent adiabatique nous a conduits à proposer de nouvelles équations d'état. Nous montrons que ces nouvelles relations ont une précision comparable à celle des équations de référence et nous permettent ainsi de décrire en particulier la phase liquide de l'eau douce, de l'eau de mer et de l'hélium-3 et 4. Différentes « anomalies » de ces milieux sont alors mises en évidence et discutées.

L'ouvrage décrit ainsi un « voyage au fil et au travers de l'eau » en portant un regard croisé sur l'histoire des hommes, l'histoire des sciences et des techniques, la géographie terrestre et sous-marine, la dynamique et la thermique des océans et les sciences traitant des propriétés physiques des liquides. Les lecteurs curieux attirés par les voyages, les sciences et l'histoire, découvriront dans le volume 1 le contexte et le déroulement d'une grande expédition scientifique. Les étudiants, les ingénieurs, les chercheurs et les enseignants en physique, mécanique des fluides, océanographie, trouveront aussi dans les volumes 2 et 3 matière à approfondir leurs connaissances.

Nous tenons à remercier chaleureusement Bernard Castaing, ancien professeur à l'université Joseph Fourier (Grenoble-I) et à l'ENS de Lyon pour sa relecture attentive du manuscrit et ses remarques pertinentes. Nous exprimons notre gratitude à Ferdinand Volino et André Denat, directeurs de recherches au CNRS, et à Jacques Bossy, chargé de recherches au CNRS, qui ont bien voulu nous faire part de leurs observations et de leurs conseils durant la préparation du manuscrit et pour leur lecture attentive du document final. Nous adressons nos vifs remerciements à Armelle Michetti, responsable de la bibliothèque des laboratoires de physique du campus CNRS de Grenoble, pour sa contribution à la recherche de documents souvent anciens et à diffusion restreinte qui nous a permis d'illustrer et d'étayer les parties histoire des sciences de l'ouvrage.

Nous remercions également les personnes qui nous ont apporté un support particulier : Michel Aitken, Philippe Vincent, Yonghua Huang, Glenn M. Stein, J. Steven Dews.

Enfin, nous tenons à remercier les organismes et leurs personnels qui nous ont aimablement autorisés à utiliser une partie de leurs fonds iconographiques, et en particulier, le Natural History Museum de Londres, le National Portrait Gallery de Londres, l'United Kingdom Hydrographic Office de Londres, l'université de Vienne (Autriche), le musée scientifique du lycée Louis-le-Grand, Orange/DGCI.

Les références bibliographiques portant sur des points précis figurent en notes de bas de page et celles à caractère plus général sont rassemblées dans la partie bibliographie présentée à la fin de chaque volume. Les numéros de renvoi de notes de bas de page correspondent toujours à des notes de bas de page dudit chapitre.