



Organisation
des Nations Unies
pour l'éducation,
la science et la culture



**COMMISSION OCÉANOGRAPHIQUE
INTERGOUVERNEMENTALE**
(de l'UNESCO)

IOC-XXV/2 Annexe 5

Distribution restreinte

PARIS, le 27 avril 2009
Original anglais

Vingt-cinquième session de l'Assemblée
UNESCO, Paris, 16-25 juin 2009

Point 4.3.2.1 de l'ordre du jour provisoire

CONSIDÉRATIONS CONCERNANT L'ADOPTION ÉVENTUELLE D'UNE NOUVELLE FORMULATION DE L'ÉQUATION D'ÉTAT DE L'EAU DE MER

Résumé

Le présent document expose dans les grandes lignes l'historique de l'élaboration d'une nouvelle équation d'état de l'eau de mer (TEOS-10) et décrit les avantages techniques que présente cette équation par rapport à la norme UNESCO en vigueur (EOS-80). Cette nouvelle norme a été mise au point par le Groupe de travail 127 (SCOR/AISPO). Plusieurs organes subsidiaires principaux et groupes d'orientation scientifique de la COI ont étudié l'opportunité de son adoption par l'Assemblée à sa 25^e session, en remplacement de l'actuelle norme UNESCO, qui est largement utilisée. À sa 25^e session, l'Assemblée sera invitée à approuver une résolution portant adoption de la nouvelle norme (paragraphe 13), à veiller à la mise en œuvre de cette résolution au niveau national (paragraphe 15) et à mobiliser suffisamment de ressources extrabudgétaires pour que le secrétariat puisse mener une campagne d'information active, et notamment passer contrat pour l'établissement, la publication, dans toutes les langues officielles de la COI et de l'OMM, et la diffusion à grande échelle d'un rapport succinct sur la norme TEOS-10 (paragraphe 17).

Historique

1. Pendant trente ans, l'Échelle de salinité pratique, PSS-78, ainsi que l'Équation internationale d'état de l'eau de mer (Documents techniques de l'UNESCO sur les sciences de la mer n° 36, 1981), qui définit la densité de l'eau de mer en fonction de la salinité pratique, de la température et de la pression, ont pleinement donné satisfaction à la communauté océanographique. Le Groupe mixte d'experts sur les tables et normes océanographiques (JPOTS) a également adopté un algorithme pour la capacité calorifique spécifique de l'eau de mer à pression constante, une expression de la vitesse du son dans l'eau de mer, et une formule pour la température du point de congélation de l'eau de mer (Documents techniques de l'UNESCO sur les sciences de la mer n° 44, 1983). Il soutient en outre trois autres algorithmes concernant la conversion entre la pression hydrostatique et la profondeur, le calcul du gradient adiabatique et le calcul de la température potentielle. Pour des raisons de commodité, tous ces algorithmes sont collectivement désignés ici sous le terme « EOS-80 », car ils représentent les meilleures pratiques océanographiques appliquées depuis le début des années 1980 à ce jour.

2. Le SCOR (Comité scientifique de la recherche océanique) et l' AISPO (Association internationale des sciences physiques de l'océan) ont constitué en 2005 le Groupe de travail 127 sur « La thermodynamique et l'équation d'état de l'eau de mer » (dénommé ci-après le WG-127). Ce groupe a mis au point une collection d'algorithmes (dénommée ci-après la TEOS-10) regroupant nos meilleures connaissances sur la thermodynamique de l'eau de mer et fournissant des méthodes rigoureuses pour le calcul des propriétés de l'eau de mer, y compris sa densité.

3. L'Association internationale pour les propriétés de l'eau et de la vapeur (IAPWS-15, Berlin, 7-11 septembre 2008) a adopté la fonction de Gibbs pour l'eau de mer, établie par le WG-127 (IAPWS-08).

4. Le Comité directeur scientifique du GOOS (GSSC-IX, Perth, 25-27 février 2009), l'Échange international des données et de l'information océanographiques (IODE-XX, Beijing, 4-9 mai 2009) et le Comité intergouvernemental pour le GOOS (I-GOOS-IX, Paris, 10-12 juin 2009) ont étudié de façon plus approfondie les conséquences de l'adoption de la TEOS-10. Au moment de l'établissement du présent document de travail, aucun de ces groupes n'avait exprimé son opposition à l'adoption de la TEOS-10.

5. En 2009, la Section des observations et services océaniques de la COI a mené une étude, réalisée par des pairs, au cours de laquelle de nombreux experts scientifiques représentant l'ensemble de la communauté internationale ont été priés d'examiner la TEOS-10, notamment sa valeur technique et scientifique et la possibilité d'une adoption au niveau intergouvernemental, et de formuler leurs observations à ce sujet. Au moment de l'établissement du présent document de travail, aucun de ces experts n'avait exprimé son opposition à l'adoption de la TEOS-10.

Contexte technique

6. Ces dernières années, les aspects suivants de la thermodynamique de l'eau de mer sont devenus manifestes et donnent à penser qu'il est opportun de redéfinir les propriétés thermodynamiques de l'eau de mer :

- plusieurs des expressions polynomiales de l'Équation internationale d'état de l'eau de mer (EOS-80) ne sont pas complètement cohérentes entre elles car elles n'obéissent pas exactement aux relations de Maxwell en dérivées croisées de la thermodynamique. Cette nouvelle approche résout ce problème ;
- une description thermodynamique plus exacte de l'eau pure (IAPWS-95) est apparue depuis la fin des années 1970. De même, d'autres mesures assez exactes des propriétés de l'eau de mer ont été réalisées et peuvent être rassemblées en une nouvelle description

thermodynamique de l'eau de mer, par exemple (i) la capacité calorifique, (ii) la vitesse de propagation du son et (iii) la température de densité maximale ;

- aujourd'hui, on comprend mieux l'impact que la variation de la composition de l'eau de mer dans différents bassins océaniques a sur la densité de l'eau de mer ;
- le fait que l'océan est de plus en plus perçu comme faisant partie intégrante de la réserve de chaleur de la planète met en évidence la nécessité d'avoir des expressions précises pour l'entropie, l'enthalpie et l'énergie interne de l'eau de mer afin que les flux de chaleur puissent être déterminés d'une manière plus précise dans l'océan (l'entropie, l'enthalpie et l'énergie interne n'étaient pas disponibles à partir de l'EOS-80) ;
- la température de congélation et le point de fusion sont calculés d'une manière plus précise que dans l'EOS-80 ;
- l'échelle de température a été révisée de IPTS-68 à ITS-90 et les valeurs révisées de l'UICPA (Union internationale de chimie pure et appliquée) ont été adoptées pour le poids atomique des éléments ;
- contrairement à la salinité pratique utilisée dans l'EOS-80, la salinité absolue employée dans la TEOS-10 est rigoureusement constante. Elle est exprimée en unités SI.

7. Pour calculer toutes les propriétés thermodynamiques de l'eau de mer, il suffit de connaître un seul de ses « potentiels thermodynamiques ». J.W. Gibbs (1873) a découvert que :

« une équation donnant l'énergie interne en termes d'entropie et de volume spécifique, ou plus généralement toute équation finie entre l'énergie interne, l'entropie et le volume spécifique, pour une quantité définie d'un quelconque fluide, peut être considérée comme l'équation thermodynamique fondamentale de ce fluide, et... toutes les propriétés thermodynamiques de ce fluide peuvent en être dérivées (du moment qu'il s'agit de processus réversibles). »¹

8. L'approche adoptée par le WG-127 a été de développer une fonction de Gibbs à partir de laquelle toutes les propriétés thermodynamiques de l'eau de mer peuvent être extraites par simple manipulation mathématique (par exemple la dérivation). Grâce à cette approche, les différentes propriétés thermodynamiques sont cohérentes (du fait qu'elles obéissent aux relations de Maxwell en dérivées croisées) et complètes (car chacune d'entre elles peut être dérivée du potentiel donné). La fonction de Gibbs (ou potentiel de Gibbs) est une fonction de la salinité absolue (plutôt que de la salinité pratique), de la température et de la pression. Le recours à la salinité absolue comme variable de salinité de la fonction de Gibbs, ainsi que pour toutes les autres fonctions thermodynamiques (comme la densité), est une rupture par rapport à la pratique actuelle (EOS-80). La salinité absolue est préférée à la salinité pratique car les propriétés thermodynamiques de l'eau de mer sont directement liées à la masse des composants dissous (c'est-à-dire la salinité absolue), tandis que la salinité pratique ne dépend que de la conductivité. Par exemple, remplaçons une petite quantité d'eau pure par la même masse de silicate, dans un échantillon d'eau de mer isolé, à température et pression constantes. Comme le silicate n'est pas ionique, la conductivité (et par conséquent la salinité pratique) reste quasiment inchangée, tandis que la salinité absolue augmente. Le module de Young indique que la densité, l'enthalpie, etc., sont modifiées en raison du changement de salinité absolue. De même, si une faible masse de NaCl, par exemple, est ajoutée et si la même masse de silicate est retirée de l'échantillon, la salinité absolue ne changera pas (et d'après le module de Young, la densité, l'enthalpie, etc., resteront quasiment inchangées), mais la salinité pratique augmentera.

¹ Gibbs, J. W., 1873: Graphical methods in the thermodynamics of fluids, Trans. Connecticut Acad. Arts and Sci., 2, 309-342.

9. Cette fonction de Gibbs relative à l'eau de mer a été publiée dans des revues avalisées par des pairs, ainsi que par l'Association internationale pour les propriétés de l'eau et de la vapeur sous l'appellation IAPWS-08. Cette nouvelle approche de la thermodynamique de l'eau de mer est collectivement désignée sous l'expression « Équation thermodynamique de l'eau de mer-2010 », ou « TEOS-10 » en abrégé.

10. Une différence notable par rapport à la pratique en vigueur recommandée par le WG-127 est l'adoption de la salinité absolue en vue de son utilisation dans les revues pour décrire la salinité de l'eau de mer, mais aussi comme variable de salinité dans les algorithmes servant à calculer les diverses propriétés thermodynamiques de l'eau de mer. Cette recommandation représente une rupture par rapport à la pratique établie consistant à utiliser la salinité pratique et à la considérer, d'une manière générale, comme la meilleure estimation de la salinité absolue. Cette pratique est inexacte et doit être corrigée. Il convient toutefois de noter que le WG-127 recommande vivement que la salinité signalée aux centres nationaux de données océanographiques reste la salinité pratique calculée sur l'échelle de salinité pratique de 1978 (adéquatement adaptée aux températures ITS-90).

11. Il est préférable de continuer à enregistrer la salinité pratique, et non la salinité absolue, dans ces répertoires de données pour trois très bonnes raisons. Premièrement, la salinité pratique est une quantité mesurée presque directement, alors que la salinité absolue (la fraction en masse du sel marin dans l'eau de mer) est généralement une quantité dérivée. En d'autres termes, on calcule la salinité pratique à partir de mesures de la conductivité, de la température et de la pression, alors qu'à ce jour, on dérive la salinité absolue à partir d'une combinaison de ces mesures ainsi que d'autres mesures et corrélations qui ne sont pas encore bien établies. La salinité pratique calculée est préférée à la valeur de conductivité effectivement mesurée sur place en raison de sa constance face aux changements de températures ou de pression ou à la dilution avec de l'eau douce. Deuxièmement, il est essentiel de ne pas semer la confusion dans les bases de données nationales, car un changement dans la manière dont la salinité est signalée peut ne pas être pris en compte à un moment ou à un autre du processus, et les données seraient alors mal interprétées comme reflétant une réelle hausse de la salinité de l'océan. Troisièmement, l'algorithme servant à déterminer la « meilleure » estimation de la salinité absolue dépend de la composition des composants dissous, qui, sur la base d'estimations précises, est reconnue comme étant variable au niveau régional. Il reste que cette analyse sera vraisemblablement affinée grâce aux recherches futures ainsi qu'aux observations cumulées et, partant, ne manquera pas d'évoluer.

12. Les principaux avantages de la nouvelle description de l'eau de mer sont les suivants :

- l'approche fondée sur la fonction de Gibbs permet de calculer l'énergie interne, l'entropie, l'enthalpie, l'enthalpie potentielle et les potentiels chimiques de l'eau de mer, ainsi que le point de fusion de la glace et la chaleur latente de la vapeur. Ces quantités ne pouvaient pas être dérivées de l'Équation internationale d'état, mais sont essentielles pour calculer d'une manière exacte la chaleur transférée entre l'océan, la couche de glace et l'atmosphère au-dessus ;
- les quantités thermodynamiques mesurées grâce à la nouvelle approche sont tout à fait cohérentes entre elles ;
- la nouvelle variable de salinité, la salinité absolue, est exprimée en unités SI standard. En outre, le traitement des flux d'eau douce et les flux de masse dans les modèles océaniques se prêteront à l'utilisation de la salinité absolue, mais ne sont que moyennement adaptés à l'emploi de la salinité pratique ;
- pour la première fois, l'influence de la composition de l'eau de mer, qui varie d'un endroit à l'autre, peut être systématiquement prise en compte grâce à l'utilisation de la salinité absolue. En haute mer, la détermination de la composition variable de l'eau de mer a un

effet non négligeable sur le gradient de densité horizontal établi à partir de l'équation d'état et, partant, sur le calcul des courants à l'aide de la relation dite du « vent thermique » ;

- la composition de référence de l'eau de mer en conditions normales appuie les études physiochimiques marines (solubilité des composants du sel marin, alcalinité, pH, acidification de l'océan par suite de la hausse des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère, etc.) ;
- la TEOS-10 est applicable à un plus large éventail de salinités que l'EOS-80. Cela est particulièrement important dans les régions où la salinité est très faible ou très élevée, telles que les estuaires, les lagunes et les infiltrations de saumure.

Stratégie proposée pour donner suite à l'adoption éventuelle d'une nouvelle norme par la COI

13. L'Assemblée sera invitée à s'engager à : (i) adopter la formulation TEOS-10 de la thermodynamique et de l'Équation d'état de l'eau de mer, en remplacement de l'actuelle norme EOS-80 de l'UNESCO ; et (ii) allouer suffisamment de ressources au secrétariat de la COI (budget ordinaire, contributions extrabudgétaires et détachements de personnel) pour qu'il puisse effectivement publier et diffuser la norme TEOS-10 et convoquer une réunion finale du WG-127 SCOR/AISPO.

14. Aucun texte n'était disponible au moment de l'établissement du présent document de travail, mais un projet de résolution, destiné à être examiné par les États membres à la 25^e session de l'Assemblée de la COI, sera vraisemblablement élaboré lors de la neuvième session de l'I-GOOS (Paris, 10-12 juin 2009).

15. Si l'Assemblée de la COI, à sa 25^e session, adopte une résolution visant à remplacer les actuels algorithmes standard de l'UNESCO servant à calculer l'Équation d'état de l'eau de mer (EOS-80) par la nouvelle norme proposée (TEOS-10), la mesure de suivi la plus importante consistera à faire en sorte que les États membres mettent en œuvre cette résolution au niveau national.

16. L'Équation d'état est utilisée par des organismes publics, mais elle est aussi largement employée dans de nombreux modèles et activités sur le terrain par divers établissements de recherche universitaires ainsi que par le secteur privé. Une campagne d'information active ciblée sur les institutions publiques de pays en développement, ainsi que sur les établissements universitaires et privés au niveau mondial, sera donc nécessaire pour garantir l'adoption à grande échelle de la nouvelle norme.

17. Aucun financement n'a été alloué à une quelconque activité relative à l'Équation d'état au titre du budget ordinaire de la COI, ni durant le biennium en cours ni dans les plans pour le biennium 2010-2011. Les États membres devront donc mobiliser des fonds extrabudgétaires, de l'ordre de 100 000 dollars des États-Unis, sous forme de contributions au Compte spécial de la COI pour que le secrétariat de la Commission puisse donner suite à une éventuelle résolution en convoquant une réunion finale du WG-127 fin 2009, et en passant contrat pour l'établissement d'une courte publication sur la norme TEOS-10 dans la série des Manuels et guides de la COI, sa traduction dans les six langues officielles de la COI et de l'OMM, et sa distribution à grande échelle.