

Un modèle spatial des taux d'émersion appliqué au domaine intertidal de la baie du Mont Saint-Michel

Domaine intertidal
Taux d'émersion
Modélisation spatiale
Système d'information géographique

Intertidal zone
Emersion rates
Spatial modelling
Geographical information system

Véronique MADEC

Groupe de Recherche «Applications thématiques de la télédétection» n°103,
Centre National de la Recherche Scientifique, 191, rue Saint-Jacques, 75005 Paris.

Reçu le 28/02/91, révisé le 7/05/91, accepté le 19/06/91.

RÉSUMÉ

L'étude du fonctionnement des écosystèmes intertidaux est en grande partie fondée sur l'analyse des rythmes biologiques liés aux mouvements de la mer. Cette analyse peut s'appuyer sur l'estimation d'un taux d'émersion moyen en tout point de l'estran. L'évaluation de ce paramètre fournit un caractère explicatif quant à la répartition des espèces animales et végétales. Nous présentons ici un modèle spatial d'estimation du taux d'émersion fondé sur le traitement de données géoréférencées au sein d'un système d'information géographique (SIG).

Oceanologica Acta, 1991. 14, 5, 525-529.

ABSTRACT

A spatial model of emersion rates applied to the intertidal zone of the Bay of Mont Saint-Michel

Studies of the functioning of intertidal ecosystems are widely based on analyses of the biological rhythms due to sea movements, estimating an average rate for emersion at all points of the foreshore. This estimate supplies an explicative parameter related to distribution of animal and vegetable species. We present a spatial model for estimation of emersion rates based on the processing of geocoded data within a geographical information system (GIS).

Oceanologica Acta, 1991. 14, 5, 525-529.

INTRODUCTION

La zone intertidale est située à l'interface entre les influences aériennes, marines et continentales. Sur les côtes à marée semi-diurne, les organismes vivants sont soumis à l'alternance bi-quotidienne des marées qui provoque de brusques écarts de température, de salinité, d'éclairement et de dessiccation (Gouleau, 1975). La quasi-totalité de ces organismes étant d'origine marine, c'est durant les périodes d'immersion qu'ils retrouvent leurs fonctions respiratoires et nutritives.

La durée de l'émersion joue donc un rôle important sur le métabolisme de la faune et de la flore intertidale et condi-

tionne en grande partie leur répartition spatiale, la compétition pour l'espace étant principalement commandée par leur capacité de résistance à la dessiccation (Vernberg et Vernberg, 1972).

La relation entre la zonation des espèces littorales et le taux d'émersion est modulée par plusieurs facteurs : la pente et la nature sédimentaire de l'estran, en premier lieu, qui caractérisent les modalités de l'écoulement; la capacité d'enfouissement des espèces, en second lieu, qui leur permet d'occuper des secteurs où l'importance du taux d'émersion en surface leur interdirait de vivre (Newel, 1976).

Il serait donc illusoire de vouloir établir un lien direct entre

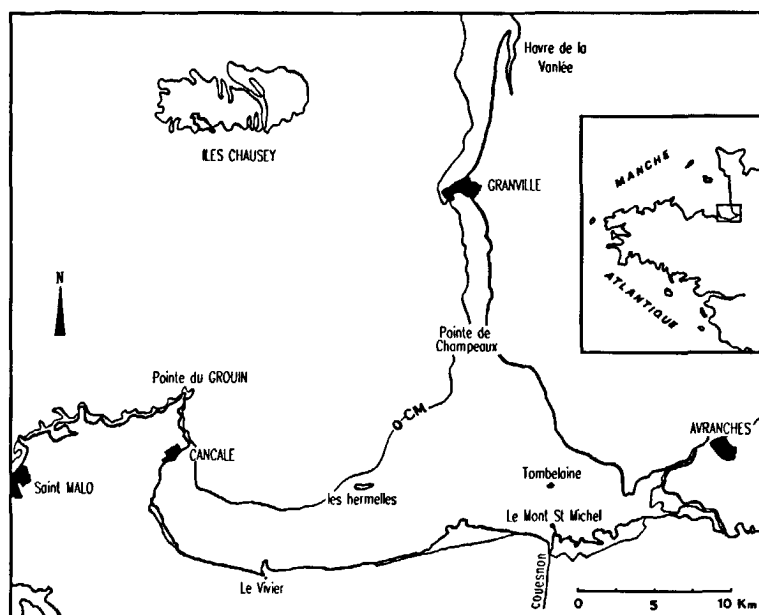


Figure 1

Localisation de la zone d'étude.

Localization of the study zone.

taux d'émergence et répartition spatiale des organismes vivants. Cependant, le taux d'émergence est un paramètre indispensable à l'analyse des facteurs complémentaires (physiques, biologiques et chimiques) qui expliquent la présence d'une espèce dans un écosystème littoral (Vernberg et Vernberg, 1981).

Afin d'établir et de quantifier ce paramètre, nous avons conçu un modèle spatial d'estimation des fréquences d'émergence sur l'estran de la baie du Mont Saint-Michel. Ce modèle, applicable au cas particulier d'une marée de coefficient donné, a ensuite été étendu par intégration temporelle à l'ensemble des marées d'un Saros - c'est-à-dire la période de 18 ans et 11 jours au terme de laquelle les marées se retrouvent à la même heure et avec la même amplitude par rapport au passage de la lune au méridien considéré - afin d'estimer un taux d'émergence moyen en tous points de l'estran.

L'ENVIRONNEMENT DE MISE AU POINT DU MODELE

Cette étude a été développée au sein d'un système d'information géographique (SIG) constitué sur la baie du Mont Saint-Michel (Madec, 1987) et piloté à l'origine par le logiciel Geosig, développé au laboratoire Imageo du CNRS. La base d'informations géographiques, ainsi que les modules d'analyse spatiale de Geosig, ont ensuite été transférés et intégrés sous Arc/Info, logiciel de SIG mis en oeuvre depuis 1989 à Imageo.

La base d'informations géographiques du SIG intègre des données de natures diverses - cartes, mesures de terrain, images satellitaires - qui ont subi une phase préalable de numérisation et de normalisation thématique et géométrique.

Les logiciels d'analyse disponibles dans les modules Geosig implantés sous Arc/Info comprennent des fonctions statistiques, topologiques et géostatistiques, ainsi que des

modèles mathématiques ou empiriques qui ont été développés pour répondre aux besoins de l'analyse du fonctionnement des écosystèmes littoraux (Cuq, 1990).

Le modèle des taux d'émergence en baie du Mont Saint-Michel constitue un exemple de développement de modèle spatial - c'est-à-dire prenant en compte la localisation du point étudié dans l'application du modèle et produisant des résultats sous forme numérique et localisée - au sein d'un environnement de SIG, ce qui permet de réutiliser directement le résultat obtenu sous la forme d'un nouveau fichier thématique et/ou de cartographier les résultats du modèle.

LES PRINCIPES THÉORIQUES DU MODELE

La constitution d'un modèle spatial d'estimation des taux d'émergence de la zone intertidale repose sur la disponibilité d'un modèle numérique géocodé de l'hypsobathymétrie du milieu étudié. Un tel modèle a été constitué sur la baie du Mont Saint-Michel à partir de la numérisation des isobathes et des sondes de la couverture cartographique à 1 : 20 000 du Service d'Études sur l'Utilisation de la Mer (SEUM), établie sur la baie en 1959, seul document cartographique de référence disponible à cette échelle. L'interpolation bi-dimensionnelle du fichier de vecteurs numérisés a fourni un fichier maillé (fig. 2), la résolution spatiale de chaque maille étant de 100 x 100 m.

Une analyse de l'évolution littorale intervenue entre 1959 et 1985 a été réalisée à partir de la comparaison entre une collection de lignes de rivages instantanées (Pestre et Verger, 1980), extraites d'une série d'images Landsat, et la simulation des mêmes situations de marée appliquée au modèle hypsométrique de la baie du Mont Saint-Michel (Madec, 1987). Cette analyse a fourni les résultats suivants :

En fonction des résolutions spatiales (100 x 100 m) et hypsométriques (0,1 m) utilisées, l'évolution morphologique de la baie peut être considérée comme négligeable; la seule variation importante concerne l'entrée de la Petite

Baie, entre le rocher de Tombelaine et le Mont Saint-Michel, où l'on constate une divagation importante des chenaux de marée. Cette divagation ne remet cependant pas en cause l'évaluation hypsométrique de cette partie de l'estran.

Une première approximation des taux d'émerision du milieu intertidal pourrait s'appuyer sur la zonation topographique de ce fichier. Cependant, afin de prendre en compte les particularités de la propagation de l'onde de marée sur le milieu, il est nécessaire de tenir compte des variations de l'unité de hauteur, U, et du niveau de mi-marée, M, sur l'espace concerné afin d'apporter les corrections appropriées.

L'estimation du taux d'émerision est basée sur l'utilisation d'une courbe de marée type (fig. 3). Dans le cas de la baie du Mont Saint-Michel, nous avons utilisé une courbe sinusoïdale de période fixe égale à 12 h 25 mn et d'amplitude variable en fonction du coefficient de marée (Verger, 1988). Cette courbe, satisfaisante dans le cas de la baie (Phlipponneau, 1955), peut être adaptée en fonction de la variabilité du régime des marées du lieu étudié. A partir de cette courbe, le calcul du pourcentage d'émerision en un point de coordonnées i et j, $E_c\%(i, j)$, à une altitude H et pour un coefficient de marée C, revient à mesurer l'arc défini par une droite horizontale, parallèle à l'axe de mi-marée :

$$E_c\%(i, j) = [0,5 + (1/\pi \arcsin (\Delta H_{(i, j)}/U_{(i, j)} C))] \times 100 \quad [1]$$

où $\Delta H_{(i, j)}$ est l'écart en mètres par rapport au niveau de mi-marée au point considéré,

$U_{(i, j)}$ est l'unité de hauteur du point considéré

MISE EN OEUVRE DU MODELE

Correction de la variabilité locale des conditions de marée

Le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) fournit les unités de hauteur, U, et les

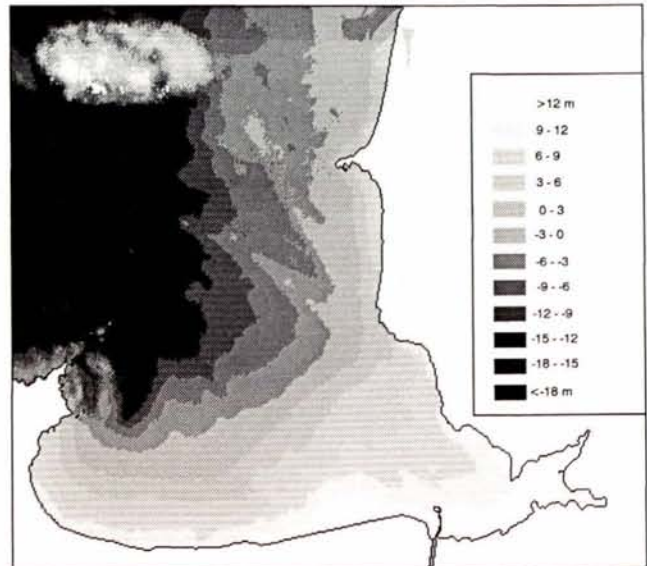


Figure 2

Représentation graphique du modèle numérique de la bathymétrie de la baie du Mont Saint-Michel.

Graphic representation of the digital bathymetric model of the Bay of Mont Saint-Michel.

niveaux de mi-marée, M, en quatre points de la baie du Mont Saint-Michel :

	U	M
Granville	5.70 m	7.20 m
Chausey	5.50 m	7.50 m
Cancale	5.65 m	7.75 m
Le Mont	6.20 m	8.40 m

Partant des valeurs fournies pour ces quatre points, spatialement bien répartis dans la baie, on peut estimer deux surfaces de tendance, obtenues par interpolation bi-linéaire, associant à tous points de l'estran une unité de hauteur et un niveau de mi-marée. On peut regretter, pour la précision de ces estimations, de n'avoir pu disposer d'un plus grand nombre de points de calage. Cependant, étant donné la forme générale de la baie et sa morphologie sous-marine

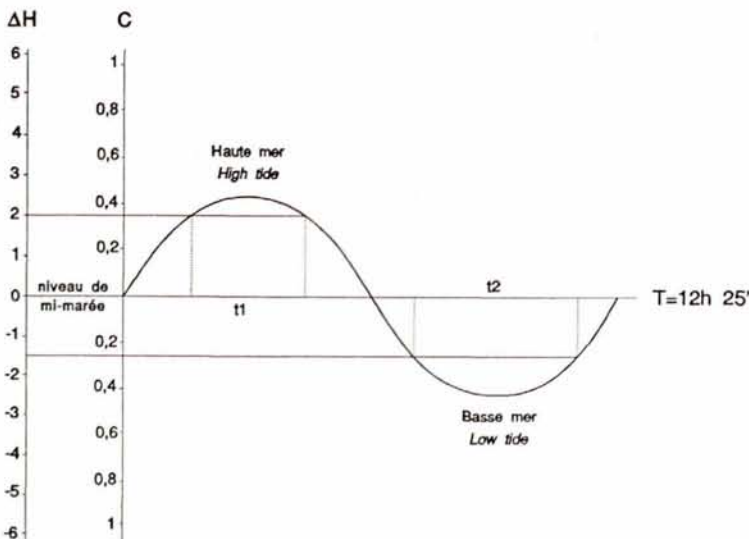


Figure 3

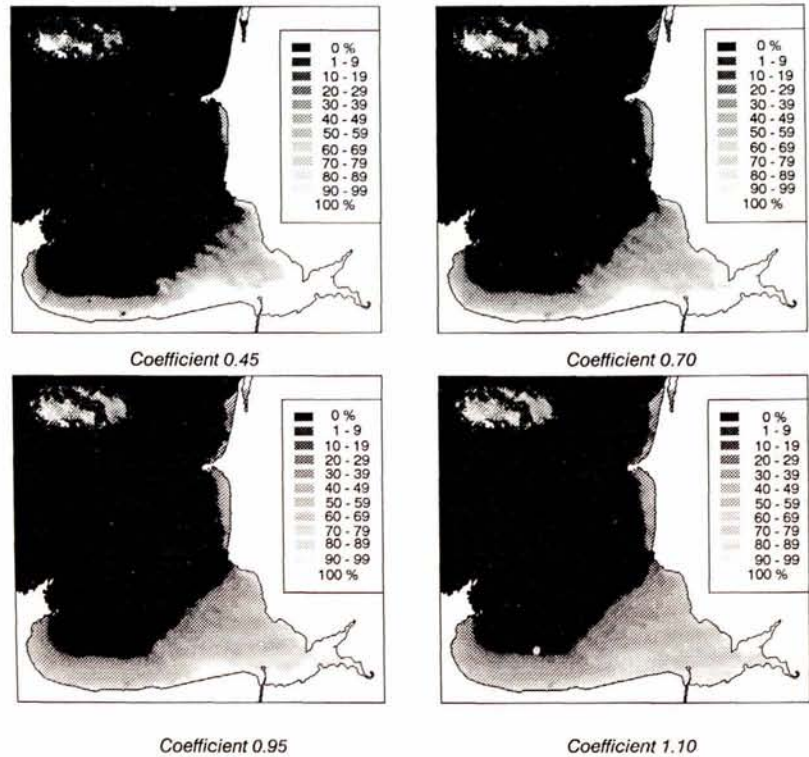
Principe de la mesure du taux d'émerision utilisant une courbe de marée sinusoïdale : DH représente l'écart en m par rapport au niveau de mi-marée ; C est le coefficient de marée ; t1 représente la durée d'immersion à DH + 2 ; t2 représente la durée d'émerision à DH-1.5.

Principle of the emersion rate measurement using a sinusoidal tidal curve : DH features the interval in m against the mid-tide level; C is the tide coefficient; t1 is the duration of immersion at DH + 2; t2 is the duration of emersion at DH-1.5.

Figure 4

Représentation graphique du résultat numérique de l'estimation du taux d'émerision pour quatre coefficients de marée.

Graphic representation of the digital result of the estimation of the emersion rate for four tide coefficients.



peu accidentée, le risque d'erreur reste faible. Les résultats des interpolations sont stockés sous forme de fichiers numériques maillés dans la base d'informations géographiques du SIG.

Estimation du taux d'émerision pour un coefficient de marée donné

A partir des trois fichiers géocodés de l'hypsobathymétrie, de l'unité de hauteur et du niveau de mi-marée, il est aisé d'appliquer la relation [1] pour obtenir un modèle spatial du taux d'émerision en tout point de l'estran pour un coefficient de marée donné. La figure 4 présente quatre estimations des taux d'émerision pour les coefficients de marée 0,45, 0,70, 0,95 et 1,10 sur la zone intertidale de la baie du Mont Saint-Michel.

Pour ces quatre exemples, il n'a pas été appliqué de correction de hauteur en fonction de la pression barométrique. Il serait cependant possible de corriger cet effet en intégrant les variations de pression sur la durée de la marée et en intervenant directement sur le fichier hypsobathymétrique pour appliquer la correction.

La correction de la pression barométrique n'aurait d'ailleurs un sens que pour une évaluation de la fréquence d'émerision réalisée pour une marée particulière, lors d'une campagne de mesures *in situ*, par exemple.

Estimation du taux d'émerision moyen en baie du Mont Saint-Michel

La connaissance des fréquences d'émerision pour un coefficient de marée donné ne fournit cependant qu'une informa-

tion relative. Pour s'affranchir des variations d'amplitude de la mer et annuler l'effet des influences lunaire et solaire sur la répartition annuelle des coefficients de marée, une intégration de l'ensemble des taux d'émerisions des 13 410 coefficients de marée d'un Saros a été effectuée afin d'obtenir un modèle géocodé du taux d'émerision moyen.

Connaissant le nombre total de coefficients de marée d'un Saros, N , qui est égal à 13 410, l'effectif de chaque coefficient (fig. 5) au cours de la même période, n_c , C étant compris entre 20 et 120, et le pourcentage d'émerision associé à chaque coefficient au point considéré, $E_c\%(i, j)$, le pourcentage d'émerision moyen de même localisation, $E_m\%(i, j)$, est calculé à l'aide de la relation suivante :

$$E_m\%(i, j) = 1/N \sum_{c=1}^{120} (n_c E_c\%(i, j)) \quad [2]$$

La figure 6 montre une représentation graphique du fichier numérique des taux d'émerision moyens en baie du Mont Saint-Michel. La légende de cette figure est identique à celles de la figure 4.

CONCLUSION

L'estimation du taux d'émerision moyen en tout point de l'estran constitue un paramètre de référence pour aborder l'analyse de la distribution des organismes de la zone de balancement des marées.

Le modèle proposé est fondé sur l'utilisation de fichiers numériques disponibles au sein d'un système d'information géographique, environnement méthodologique qui fournit une base souple et performante pour l'étude et la

cartographie des paramètres caractéristiques du fonctionnement des écosystèmes littoraux.

Le principe de ce modèle peut être applicable à tout type de côte, à condition d'utiliser une courbe de marée adaptée aux conditions du lieu étudié, ce qui suppose de prendre en compte des propagations de marée non symétriques et de pouvoir changer de modèle en fonction de la valeur du coefficient de marée.

L'analyse de la répartition spatiale de la faune et de la flore de l'estran peut s'appuyer en partie sur les résultats d'un tel modèle, en définissant pour chaque espèce l'intervalle de tolérance en émergence dans lequel elle se situe (Shelford et Olson, 1937). Bien évidemment, cette analyse doit être complétée par l'étude des intervalles de tolérances aux autres facteurs biologiques, physiques et chimiques auxquels sont sensibles les espèces vivantes.

La spatialisation de ces intervalles de tolérance au sein d'un système d'information géographique permettra ensuite de définir la notion d'aire de tolérance - passant ainsi d'une analyse stationnelle à une analyse spatiale -, de superposer les différentes aires ainsi circonscrites et d'évaluer une distribution potentielle de l'espèce considérée en opérant l'intersection des aires de tolérance.

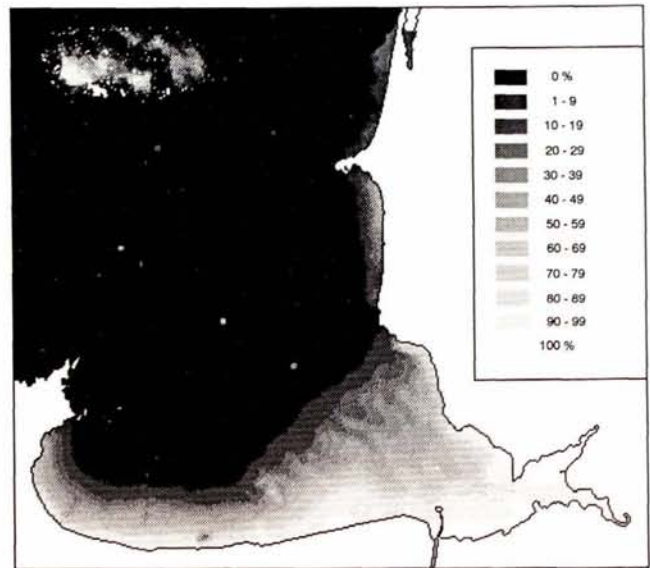


Figure 6

Représentation graphique du modèle numérique des taux d'émergence moyens en baie du Mont Saint-Michel.

Graphic representation of the digital model of the average rate of emergence in the Bay of Mont Saint-Michel.

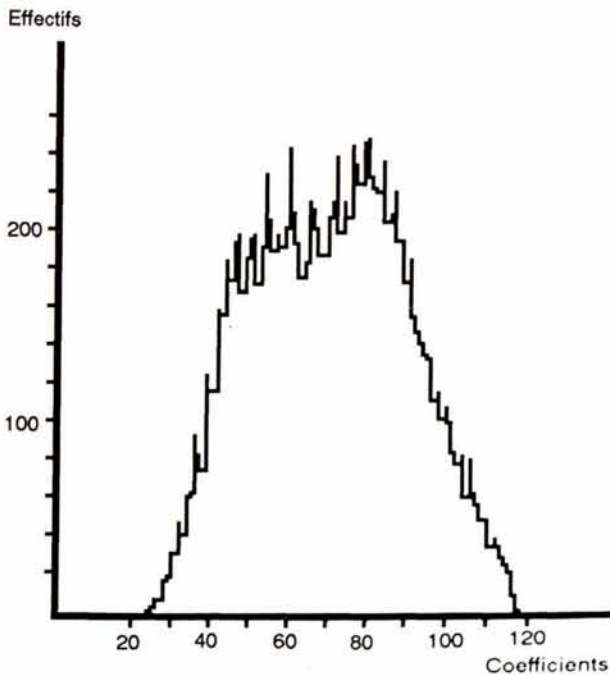


Figure 5

Représentation des effectifs des coefficients de marée au cours d'un Saros.

Representation of the number of tide coefficients during a Saros.

RÉFÉRENCES

- Cuq F.** (1990). L'utilisation des systèmes d'information géographique pour l'analyse du fonctionnement des écosystèmes. *Actes de la réunion internationale sur les systèmes d'information environnementale, MAB/Unesco, Grenoble.*
- Gouleau D.** (1975). Les premiers stades de la sédimentation sur les vasières littorales atlantiques. Rôle de l'émergence. *Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 241 pp.*
- Madec V.** (1987). Méthodes de constitution et d'exploitation d'une base de données-images sur la baie du Mont Saint-Michel. *Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale, Brest, 169 pp.*
- Newell C.** (1976) *Adaptation to environment: essays on the physiology of marine animals.* Butterworths, London, Boston, 539 pp.
- Pestre C. et F. Verger** (1980). Géomorphologie de la baie du Mont Saint-Michel par télédétection des lignes de rivage instantanées. *Annales des Mines, avril-mai 1980, 175-181.*
- Philipponneau M.** (1955). La baie du Mont Saint-Michel. *Mém. Soc. Géol. minéral. Bretagne, 11, 215 pp.*
- Shelford V.E. et S. Olson** (1937). Sere, climax and influent animals with special reference to transcontinental coniferous forest of North America. *Ecology, 16, 375-402.*
- Verger F.** (1988). *Marais et wadden du littoral français. 3^{ème} édition, Paradigme, Caen, 549 pp.*
- Vernberg W.B. et F.J. Vernberg** (1972). *Environmental physiology of marine animals.* Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 346 pp.
- Vernberg F.J. et W.B. Vernberg** (1981). *Functional adaptations of marine organisms.* Academic Press, 347 pp.

ERRATUM

Following a printing error, some terms have disappeared from three equations of the article by **ZUO *et al.*** (vol. 14, 3, May 1991, p. 253-562).

These equations should read as follows:

. Equation 2 (p. 255):

$$S = \frac{\lambda Z}{\ln (A_0/A_2)} \quad (2)$$

. Equation 4 (p. 256):

$$S = \frac{\lambda Z}{\ln (A_0/A_2)} - \frac{DB}{Z} [\ln.(A_0/A_2)] \quad (4)$$

. Equation 8 (p. 260):

$$S_i = 1 / \left\{ \left[\sum_i^{i+1} (1/\sqrt{x_i}) \right] / 2 \right\}^2 \quad (8)$$