

SEPARATION D'ONDES EN SISMIQUE MARINE

F. Guillet, S. Bourennane, P. Gavin

CEPHAG, UA346 CNRS, ENSIEG, BP46, F-38402 St Martin d'Hères Cedex

RÉSUMÉ

En sismique marine, les réseaux rectilignes de capteurs équidistants sont couramment utilisés. De tels instruments permettent de séparer en vitesse apparente les ondes réfléchies, réfractées par les discontinuités entre deux couches de nature différente du sous-sol ainsi que leurs multiples respectifs. Nous avons adapté à ce type de données expérimentales des méthodes de traitement "haute résolution" développées en traitement d'antenne. Ces méthodes font appel aux propriétés de la matrice interspectrale des signaux reçus sur chaque capteur et de ses éléments propres. Diverses techniques d'estimation ont été appliquées, périodogramme lissé, "focalisation". Les algorithmes de localisation (goniomètre), identification (pseudo-inverse), ont permis de reconstituer séparément, les diverses ondes enregistrées sur un réseau de capteurs.

SUMMARY

In seismic underwater research, linear arrays of equidistant sensors are frequently used. It allows to separate, in apparent velocity, the waves refracted or reflected by discontinuities between different layers of the underground and their own multiples. We adapt "high resolution" processing methods used in antenna analysis to this kind of data. These techniques use spectral matrix and eigen elements properties. Different estimating ways are applied as smoothed periodogram method and "focusing". Localization and identification algorithms allow the reconstitution of each wave recorded on the array of sensors.

Le travail présenté ici concerne le traitement multidimensionnel de données de sismique marine. En sismique, les signaux (ou traces) enregistrés sur les capteurs, sont analysés de façon à mettre en évidence et à localiser des arrivées ou sources prépondérantes (ondes réfléchies réfractées....) significatives des réflecteurs très marqués dans le sous-sol.

Les opérations de traitement couramment utilisées en géophysique sont des réalignements de signaux selon une direction d'arrivée θ "probable" et de moyennage sur tous les capteurs. Des techniques de filtrage spatio-temporel [1] sont également employées pour séparer des ondes d'incidences éloignées (montantes et descendantes sur un réseau de capteurs vertical). Ces techniques nécessitent la connaissance a priori des diverses ondes et se révèlent peu performantes lorsque ces ondes sont d'incidences voisines.

Des méthodes de traitement multicapteurs utilisant les propriétés de la matrice interspectrale ont été récemment développées en sismique [2], nous nous proposons, dans cette même voie, d'adapter des techniques dites "hautes résolutions" fréquemment utilisées en traitement d'antenne.

Dans un premier temps nous nous intéressons plus particulièrement à la localisation des diverses sources. Dans un enregistrement sismique, celles-ci correspondent en fait à des ondes réfléchies par les discontinuités du milieu de propagation. Puis nous utilisons le résultat de ces techniques

afin d'extraire et d'identifier chaque onde observée. Enfin nous appliquons ces méthodes à des données expérimentales provenant d'une campagne de mesures en mer.

APPLICATION DES MÉTHODES DÉVELOPÉES EN TRAITEMENT D'ANTENNE À L'ESTIMATION DES PENTES DES ONDES EN SISMIQUE MARINE.

Rappel:

Soit $\underline{r}(t) = [r_1(t), \dots, r_N(t)]^T$, le vecteur des signaux reçus sur N capteurs d'une antenne,

$$TF[\underline{r}(t)] = [R_1(f), \dots, R_N(f)]^T$$

que l'on peut modéliser par: $\underline{R}(f) = \underline{U}(f)\underline{S}(f) + \underline{B}(f)$

où $\underline{U}(f)$, $\underline{S}(f)$, $\underline{B}(f)$ sont respectivement la matrice de transfert entre les P sources émettrices (diverses ondes incidentes) et les N capteurs, la TF des signaux émis par les sources et la TF des bruits additifs dus au milieu de propagation. En se plaçant dans des hypothèses classiques en traitement d'antenne [3], on montre que la matrice interspectrale des signaux reçus s'écrit:

$$\underline{\gamma}(f) = \underline{U}(f) \underline{\gamma}_s(f) \underline{U}^+(f) + \sigma^2(f) \underline{I}$$

avec $\underline{\gamma}_s(f) = E\{\underline{S}(f)\underline{S}^+(f)\}$



La décomposition spectrale de $\underline{\underline{\gamma}}(f)$ est: $\underline{\underline{\gamma}}(f) = \underline{\underline{V}}(f) \underline{\underline{\Lambda}}(f) \underline{\underline{V}}^+(f)$

où $\underline{\underline{V}}(f) = \left[\begin{array}{c} \underline{\underline{v}}_1(f), \dots, \underline{\underline{v}}_p(f), \underline{\underline{v}}_{p+1}(f), \dots, \underline{\underline{v}}_N(f) \end{array} \right]$ représente les

vecteurs propres et $\underline{\underline{\Lambda}}(f) = \text{diag} [\lambda_1(f), \dots, \lambda_N(f)]$, la matrice des valeurs propres.

Estimation des pentes des ondes

Plusieurs méthodes ont été développées en traitement d'antenne [4]. Nous avons retenu la méthode du goniomètre (Music). Bienvenu [5] a présenté cette méthode qui exploite la propriété d'orthogonalité entre les deux sous-espaces formés par les premiers vecteurs propres $\underline{\underline{V}}_S(f)$ associés au plus grandes valeurs propres et les vecteurs propres restants $\underline{\underline{V}}_B(f)$ associés au plus petites valeurs propres. Sous l'hypothèse d'un modèle de propagation "ondes planes", il suffit d'évaluer la fonction $Q(\theta)$ à fréquence constante pour estimer les directions (ou pentes) des ondes émises:

$$Q(\theta) = \left| \sum_{i=P+1}^N |\underline{\underline{M}}^+(\theta) \underline{\underline{v}}_i(\theta)|^2 \right|^{-1}$$

où θ varie de -90° à $+90^\circ$

$$\text{et } \underline{\underline{M}}(\theta) = \frac{1}{\sqrt{N}} \left[1, e^{-j\varphi}, \dots, e^{-j(N-1)\varphi} \right]^T$$

$$\text{avec } \varphi = 2\pi f \frac{d}{c} \sin\theta$$

d : espacement entre capteurs

c : vitesse de propagation

Les ondes réellement reçues ont pour incidences les valeurs de θ pour lesquelles la fonction $Q(\theta)$ est maximale. Le nombre P des sources émettrices est obtenu en utilisant les critères de détection couramment appliqués en traitement d'antenne, AIC-MDL [6,3] et que nous n'aborderons pas dans cette étude.

-- Cas de sources corrélées:

Dans le cas de sources totalement corrélées, la matrice interspectrale des sources est singulière. Afin de rendre le traitement possible, des techniques de décorrélation ont été développées ces dernières années. Nous rappelons deux techniques qui sont basées sur le lissage dans les domaines spatial et fréquentiel.

Dans le domaine spatial, cette technique consiste à diviser l'antenne en k sous-réseaux (antenne) de $L \geq P+1$ capteurs avec $L-1$ capteurs communs entre deux sous antennes adjacentes. La matrice interspectrale après lissage spatial est définie comme:

$$\hat{\underline{\underline{\gamma}}}(f) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \underline{\underline{\gamma}}_i(f)$$

Sous la condition que le nombre de moyennes des matrices interspectrales $K \geq P$, la matrice $\hat{\underline{\underline{\gamma}}}(f)$ est de rang P [7].

L'estimation des matrices en considérant les données dans le sens direct puis rétrograde permet de minimiser le nombre de capteurs à $N \geq \frac{3P}{2}$ [8]. La matrice interspectrale est définie dans ce cas de la façon suivante:

$$\hat{\underline{\underline{\gamma}}}(f) = \frac{1}{2K} \sum_{i=1}^K (\underline{\underline{\gamma}}_i(f) + \underline{\underline{\gamma}}_{ir}(f))$$

$$\underline{\underline{\gamma}}_i(f) = \underline{\underline{U}}_i(f) \underline{\underline{\gamma}}_s(f) \underline{\underline{U}}_i^+(f) + \sigma^2(f) \underline{\underline{I}}$$

$$\underline{\underline{\gamma}}_{ir}(f) = \underline{\underline{J}} \underline{\underline{\gamma}}_i(f) \underline{\underline{J}} \quad \text{avec } \underline{\underline{J}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Dans le domaine fréquentiel (cas de signaux à bande large), il s'agit de moyenner les différentes matrices interspectrales estimées aux différentes fréquences de manière à obtenir un seul sous-espace signal ou bruit permettant de localiser les sources. Soit L , le nombre de fréquences f_j disponibles dans la bande d'analyse, il existe des matrices de transformation $\underline{\underline{T}}(f)$ [6,3] tel que:

$$\underline{\underline{T}}(f_j) \underline{\underline{U}}(f_j) = \underline{\underline{U}}(f_c) \quad \text{pour } j = 1, L$$

où f_c est une fréquence choisie dans la bande du signal.

La matrice interspectrale est alors estimée à la fréquence de focalisation f_c de la façon suivante:

$$\hat{\underline{\underline{\gamma}}}(f_c) = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L \underline{\underline{T}}(f_j) \underline{\underline{\gamma}}(f_j) \underline{\underline{T}}^+(f_j)$$

Technique de projection et reconstitution

La connaissance des azimuts des principales ondes permet maintenant de les reconstituer, séparément les unes des autres. Considérons P ondes supposées planes reçues sur le réseau rectiligne de N capteurs, P préalablement déterminé, le signal s'écrit:

$$\underline{\underline{R}}(f) = \underline{\underline{U}}(f) \underline{\underline{S}}(f) + \underline{\underline{B}}(f)$$

La projection des données sur le modèle est une technique couramment utilisée pour filtrer les données, cependant les modèles ne sont que rarement orthogonaux entre eux, ce qui explique que deux ondes "proches" sont mal séparées par projection. Il est donc nécessaire de considérer et d'inverser globalement l'équation précédente.

Ce système est surdéterminé, une approximation peut être obtenue en minimisant $\| \underline{\underline{R}}(f) - \underline{\underline{U}}(f) \underline{\underline{S}}(f) \|^2$ au moindre carré. la solution est donnée par la pseudo-inverse:

$$\hat{\underline{\underline{S}}}(f) = (\underline{\underline{U}}(f)^+ \underline{\underline{U}}(f))^{-1} \underline{\underline{U}}(f)^+ \underline{\underline{R}}(f)$$

APPLICATION SUR DES DONNÉES EXPÉRIMENTALES

Présentation

Les données analysées proviennent de la campagne en Mer Rouge "MINOS 86" réalisée par l'IFREMER [9]. Un canon à air tracté en surface, sur un parcours de 50 km, émet un tir tous les 170 m. Une antenne réceptrice de 420 m de longueur [10], constituée de 15 hydrophones, est ancrée verticalement en fond de mer à l'origine du parcours (figure 1). Le signal est de type à bande large (5 - 10 Hz). Le signal d'émission est inconnu ou mal connu. La période d'échantillonnage est de 16 ms.

Les résultats présentés ci-dessous concernent le traitement d'un seul tir. La durée du signal traité est de 4 secondes, soient 256 points de traitement. Seuls 140 points sont représentés sur les figures suivantes, soient 2.2 secondes d'enregistrement. On peut notamment observer sur ces données les arrivées successives dans le temps de l'onde directe (première descendante D1), des premières ondes réfléchies sur les

couches peu profondes (premières montantes M_1, M_1') et des multiples fond surface M_2, D_2, \dots . Les sources sont évidemment fortement corrélées puisque résultant toutes, de l'implosion du canon à air tout au moins pour ce qui concerne les premières arrivées (ondes propagées dans l'eau sur de "faible" distance ou alors dans les couches peu profondes).

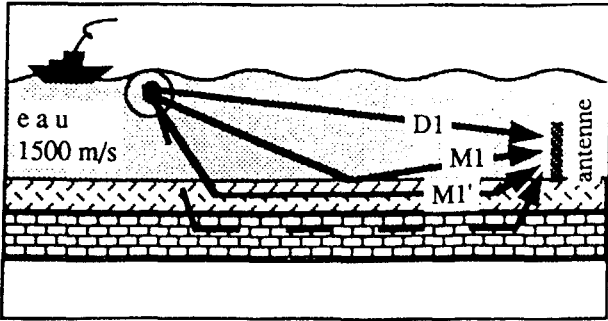


Figure 1: descriptif de l'expérimentation

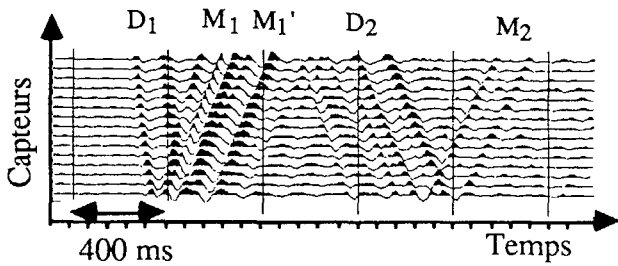


Figure 2: données: tir 16, distance émetteur antenne: 2 km, amplitude normalisée

Le spectre du signal (figure 3) est échantillonné à 0.25 Hz et comprend environ 20 points d'analyse dans la bande de signal utile (5,10 Hz).

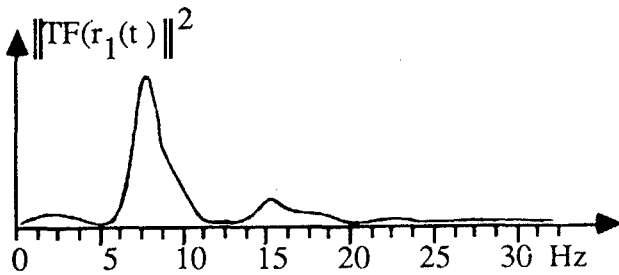


Figure 3: Densité spectrale de puissance du signal (capteur 1)

La séparation et l'identification de chaque onde $D_1, M_1, M_1', M_2, \dots$ sur plusieurs tirs consécutifs permet d'estimer les paramètres d'épaisseur, de profondeur, et de vitesse des couches dans lesquelles ce sont propagées chaque ondes.

Résultat de la localisation

-- Application de l'algorithme Music à une fréquence donnée du spectre

L'algorithme Music est appliqué une première fois directement sur les données (figure 4). La matrice interspectrale est estimée par la méthode du périodogramme lissé avec une fonction de pondération de Tuckey caractérisée par un $B_e T = 4.43$ et un moyennage spatial sur 6 traces (compromis entre nombre de moyennage afin de décorréliser les sources et

nombre de traces résultantes nécessaires à la localisation des sources). Le traitement est appliqué à la fréquence 7 Hz correspondant au maximum du spectre. Trois directions principales d'incidence sont mises en évidence par ce traitement ($-60^\circ, 15^\circ, 55^\circ$), l'angle θ considéré ici, réfère la direction de l'onde par rapport à la perpendiculaire à l'antenne, angle et pente sont liés par:

$$p = \frac{d}{c} \sin(\theta) \quad p: \text{pente.}$$

Les ondes d'incidences positives correspondent aux ondes descendantes.

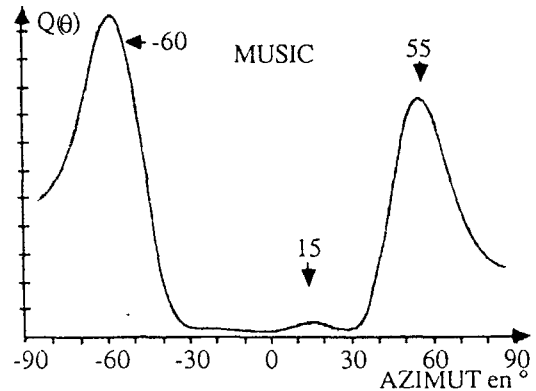


Figure 4: résultat du goniomètre, matrice estimée à 7 Hz, amplitude normalisée (l'amplitude de $Q(\theta)$ n'est en aucun cas significative de la puissance des sources)

L'observation directe des données laisse présager un nombre plus important de sources, cependant Music, appliqué également à d'autres fréquences dans la bande, ne permet pas de les détecter. La technique d'estimation de la matrice n'est pas assez robuste vis à vis de la corrélation des sources.

-- Application de l'algorithme Music après "focalisation" à la fréquence $f_c = 7$ Hz

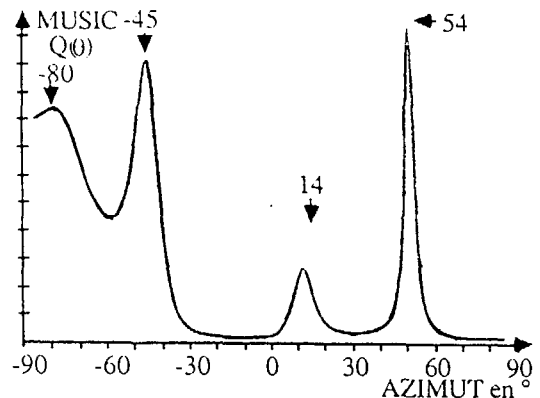


Figure 5: résultat du goniomètre, matrices focalisées à 7 Hz

La fréquence de focalisation est ici la fréquence où le spectre est maximum (7 Hz). L'opérateur de transformation a été calculé de façon à augmenter la résolution du traitement autour des directions principales précédemment détectées. Les résultats de goniométrie (figure 5), après estimation de la matrice interspectrale, confirment les résultats précédents pour les ondes descendantes (14° et 54°) et apportent un complément d'information en ce qui concerne les montantes. Ils montrent l'existence de deux ondes ($-80^\circ, -45^\circ$) dans l'ensemble préalablement détecté à -60° . Ces résultats sont vérifiés par



L'observation directe des données dans lesquelles figurent au moins quatre ondes de pentes différentes (deux montantes et deux descendantes principales).

Reconstitution des ondes, intensimétrie

Les ondes à identifier sont modélisées selon des modèles, type "onde plane", ayant pour incidences les valeurs précédemment détectées.

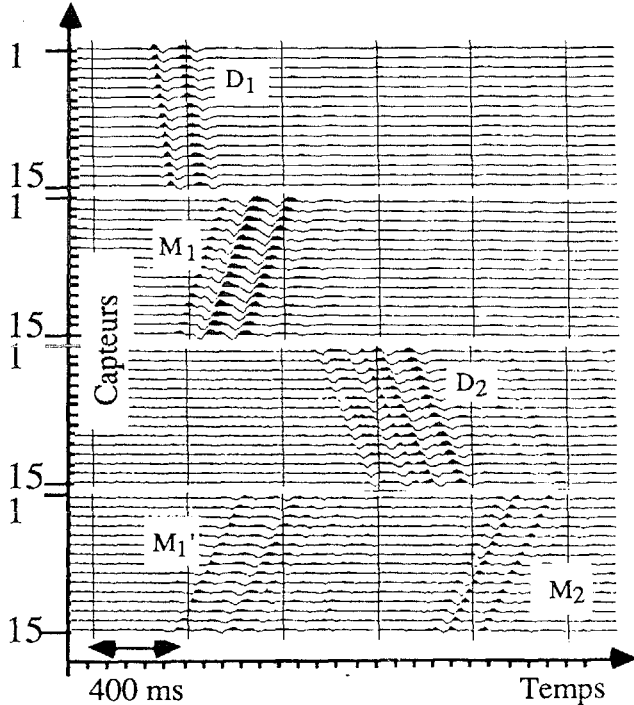


Figure 6: Séparation des signaux d'incidence: -80° , -45° , 14° , 54° , le facteur de normalisation des données initiales est conservée

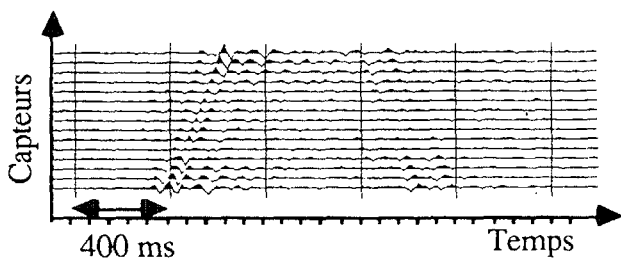


Figure 7: Résidus de traitement, signaux non localisés
Le facteur de normalisation des données initiales est conservé.

Les résultats d'identification (figure 6) mettent en évidence l'arrivée quasi simultanée de plusieurs ondes M_1 , M_1' , ... séparées sur deux des modèles détectés. La différence par rapport aux données initiales est présentée ci-dessus (figure 7). L'acuité visuelle permettait d'estimer les directions 14° , -65° , 50° , -82° , 70° . Ces directions n'ont pas toutes été localisées par l'algorithme, cependant les résidus de traitement montrent l'existence de sources non détectées (-65° , 70°) et pour lesquelles le traitement peut être recommencé afin de les identifier. Le processus peut ainsi être itératif et permettre d'identifier des ondes non perceptibles au premier traitement. Les résultats d'identification font apparaître des signatures différentes sur chacune des ondes reconstituées. Ces variations ont pour origine la mutidirectivité de l'émetteur et le contraste de vitesse peu marqué dans les premières couches sous-marines. Il apparaît cependant plusieurs ondes prépondérantes

M_1 , M_1' ,... de pentes différentes dans le premier faisceau montant. Ces ondes sont elles-même constituées d'arrivées parallèles que l'on peut séparer dans le domaine temporel par déconvolution. La provenance de chaque onde ne peut être acquise qu'après traitement de toute une partie du profil, et ainsi permettre l'évaluation de paramètres terrain.

CONCLUSION

Cet algorithme de localisation, détection, identification de signaux sismiques à bande large reçus sur une antenne, est développé afin de permettre l'automatisation du traitement d'un profil sismique global. Il met en évidence la difficulté de modélisation d'une onde propagée dans un milieu naturel. L'onde n'est jamais parfaitement plane et directive. Le processus permet cependant d'isoler les événements prépondérants reçus sur une antenne. La technique de focalisation est plus performante pour ces signaux que la technique du périodogramme lissé, cependant l'emploi préalable d'une méthode de localisation rudimentaire peut permettre une première évaluation des sources et ainsi simplifier le calcul de la fonction de transfert nécessaire à l'étape de focalisation. L'enchaînement localisation identification peut être réitéré de façon à extraire des événements initialement masqués sous les arrivées prépondérantes. Chaque onde identifiée peut être ensuite déconvoluée par le signal direct et ainsi être séparée dans le domaine temporel. De cette manière, deux arrivées parallèles ont pu être mises en évidence dans le signal M_1 .

BIBLIOGRAPHIE

- [1] I. Lecomte, F. Glangeaud, L. Géli, J. Mars, P. Gounon, P. Gavin: Signal processing applied to refraction seismic data obtained with an ocean bottom vertical seismic array: spectral matrix method and other processing., Signal processing 4, proceedings of EUSIPCO-88 vol 3 pp 1369-1372.
- [2] J. Mars, F. Glangeaud, J.L. Lacoume, J.M. Fourmann, S. Spitz: Separation of seismic wave, SEG (New-Orleans), pp 489-492, 1987.
- [3] S. Bourennane, B. Faure J.L Lacoume: Utilisation du sous-espace signal cohérent pour la localisation de sources bande large 12eme GRETSI, Juan-les-Pins 1989.
- [4] J. Munier and G.Y. Delisle: Spatial analysis in passive listening using adaptative technics IEEE Proc. Vol. 75, n° 11 Nov. 1987, pp 1458-1471.
- [5] G. Bienvenu and L. Kopp: Optimality of high resolution array processing using the eigensystem approach. IEEE - ASSP- 33, pp 1235 - 1247, Oct.1983.
- [6] H. Wang and M. Kaveh: Coherent signal subspace processing for the detection and estimation of angles of arrival of multiple wide-band sources. IEEE -ASSP- 33, pp 823-831, Aug. 1985.
- [7] T.J. Shan, M.Wax and T.Kailath: On spatial smoothing for direction of arrival estimation of coherent signals. IEEE - ASSP-33, n°4, pp 806- 811, Aug. 1985.
- [8] S.U. Pillai and B.H. Kwon: Forward / backward spatial smoothing technics for coherent signal identification. IEEE - ASSP- 37, pp 8-15, Jan. 1989.
- [9] F. Avedik, F. Géli, L. Gaulier, J.P. Le Formal: Results from three refraction profiles in the North Red Sea (above 25°) recorded with an Ocean Bottom Vertical Seismic Array, Tectonophysics 1988.
- [10] F. Avedik: Sea-floor seismology: mobile Ocean Bottom Vertical Seismic Array (OBVSA) for controlled source experiments: Ocean seismo-acoustics, T.Akal and J.M. Berkson, Plenum Publishing Corp. (1986).