

**EFFETS D'ECHOS ET D'OMBRES DIFFERENTIELS SUR LES ANTENNES DE SONAR ACTIF EN CHAMP DE FRESNEL**

Franck FLORIN (\*), Svetlana BOZINOSKI (\*\*)

(\*) THOMSON-SINTRA Activités Sous-Marines, Route de Ste Anne du Portzic, 29601 Brest Cedex, France  
 (\*\*) CEPHAG, ENSIEG, BP 46, 38402 St-Martin-d'Hères Cedex, France

**RÉSUMÉ**

Les traitements des signaux sonars actifs exploitent d'une part la décomposition des cibles sous forme de points brillants, d'autre part les formes de leurs ombres projetées sur le fond marin. Les points brillants et l'ombre projetée d'une cible en champ de Fresnel de l'antenne de réception peuvent ne pas être les mêmes pour les différents capteurs de l'antenne. Dans ces conditions le gain d'antenne devient faible. Le but de cet article est de déterminer les conditions d'apparition de ces phénomènes et d'évaluer leurs incidences sur les traitements pour des cas simples de géométrie d'objet.

**1. INTRODUCTION**

Le calcul du champ acoustique diffracté par la surface d'un objet rigide montre que celle-ci peut être modélisée sous forme de points brillants, ou points de réémissions préférentiels des ondes sonores. Dans le cas d'une cible sonar sans aspérité et parfaitement réfléchissante, la position de ces points ne dépend pas seulement de la cible, elle est aussi fonction des positions relatives à celle-ci de l'émetteur et du récepteur acoustique.

Dans le cas d'un sonar actif de type classique, les différents capteurs de réception ne voient pas le point brillant au même endroit sur la cible. Le point brillant est en effet situé, sur la surface de la cible, au point correspondant au trajet émetteur-cible-récepteur de longueur extrémale. Comme la position du récepteur est différente d'un capteur à l'autre, la position du point brillant l'est aussi. Ce phénomène est appelé dans la suite "effet d'échos différentiels".

De même l'ombre projetée derrière l'objet n'est pas vue avec la même géométrie suivant le capteur considéré. On parlera alors d'"effet d'ombres différentielles".

En général ces phénomènes ne sont pas sensibles. Ils ne peuvent intervenir qu'en champ très proche, lorsque la cible est située en zone de Fresnel de l'antenne.

Dans la suite, on détermine à l'intérieur de la zone de Fresnel, la zone où ces phénomènes restent négligeables vis à vis du traitement d'antenne classique.

On fait ainsi apparaître une distance caractéristique de la cible et de l'antenne, que l'on appellera "distance critique", en deçà de laquelle les techniques de focalisation traditionnelles perdent de leur efficacité. Les dégradations du diagramme de directivité ainsi que les pertes en gain d'antenne sont évaluées dans le cas d'un objet sphérique pour le phénomène d'échos différentiels.

**ABSTRACT**

Active sonar signal processing makes use, on the one hand of the description of the target in terms of highlights and on the other hand of projected shadows. For a target in the Fresnel zone of the receiving array, highlights and shadows could be different from one sensor to another. In that case the array processing gain becomes low. The aim of this paper is to determine when these phenomena appear and to evaluate their effects on array processing in some simple target geometries.

**2. CHAMP DIFFRACTÉ PAR UNE CIBLE RIGIDE**

2.1 Position du problème:

L'objet est éclairé conformément à la figure 1 sur laquelle on a représenté les trajets sonores relatifs à un point M quelconque situé sur la surface de l'objet. L'émetteur est désigné par la lettre E, le récepteur par la lettre P. Les trajets incidents et réfléchis sont respectivement de longueur r et s. On appelle  $r_0$  et  $s_0$  les distances respectives de E et P au centre d'inertie O de l'objet. (La dimension de l'objet est supposée petite par rapport à ces distances).  $\theta_i$  et  $\theta_d$  sont respectivement les angles d'incidence et de diffraction des ondes au point M.

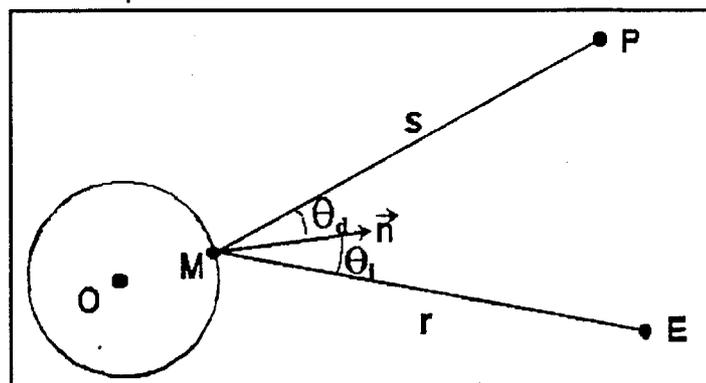


Figure 1: Diffraction par un objet

Lorsque l'objet est parfaitement réfléchissant, le champ  $U(P)$  diffracté au point P est donné avec une bonne précision (cf [4],[5]) par la forme intégrale suivante avec  $\lambda$  longueur d'onde, k nombre d'onde, A amplitude de l'onde incidente, S surface insonifiée:

$$U(P) = \frac{-i A}{2\lambda r_0 s_0} \iint_S e^{ik(r+s)} (\cos \theta_i + \cos \theta_d) dS \quad (1)$$



**2.2 Points critiques et points brillants**

Supposant que la surface puisse être paramétrée par deux variables  $x$  et  $y$  décrivant un domaine  $D$ , on peut écrire l'intégrale précédente sous la forme:

$$U(P) = \frac{-iA}{2\lambda r_o s_o} \iint_D g(x,y) e^{ik f(x,y)} dx dy \quad (2)$$

Lorsque  $k$  tend vers l'infini on montre ([3]) que l'intégrale (2) est équivalente au terme prédominant de son développement asymptotique en puissances de  $1/k$ :

$$U(P) \underset{k \rightarrow \infty}{\sim} \frac{A}{2r_o s_o} \frac{1}{\sqrt{|\square f(x_o, y_o)|}} g(x_o, y_o) e^{ik f(x_o, y_o)} \quad (3)$$

avec:  $\square = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \left( \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \right)^2$  (3-a)

Le point  $(x_o, y_o)$  est appelé point critique de première espèce ou point stationnaire ([3]). Il est défini par:

$$\left. \frac{\partial f(x,y)}{\partial x} \right|_{(x_o, y_o)} = \left. \frac{\partial f(x,y)}{\partial y} \right|_{(x_o, y_o)} = 0 \quad (3-b)$$

Cette décomposition est l'expression mathématique du théorème de la phase stationnaire. Du point de vue physique on peut l'interpréter en disant que les points critiques sont des points préférentiels de réémission des ondes diffractées. Ils constituent des "points brillants".

**2.3 Cas de la sphère:**

Un objet sphérique de centre  $O$  et de rayon  $a$  ne possède qu'un seul point stationnaire  $M_o$ . Lorsque  $1/r_o = 1/s_o$  ou lorsque  $a/r_o$  et  $a/s_o$  tendent vers 0, le point  $M_o$  est défini comme étant le point de la surface de l'objet pour lequel le plan tangent à la surface en ce point est orthogonal à la différence des vecteurs d'onde incident et diffracté au centre de l'objet. Ce point est situé sur la bissectrice de l'angle  $(OP, OE)$ .

**3. EFFETS D'ECHOS DIFFERENTIELS**

**3.1 Description du système sonar de type classique:**

Le sonar est constitué d'un émetteur  $E$  quasi ponctuel ayant un diagramme de directivité large. La résolution est obtenue par l'antenne réceptrice qui forme des voies étroites à l'intérieur de la zone éclairée (figure 2).

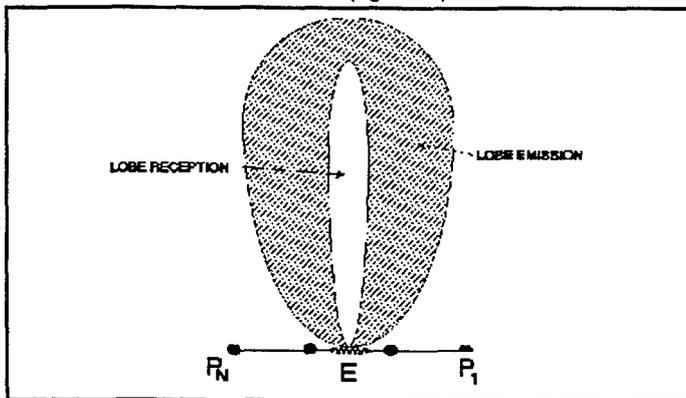


Figure 2: Configuration générale du sonar

L'antenne de réception est supposée linéaire constituée de  $N$  capteurs distincts aux positions  $P_n$ .

**3.2 Glissement du point brillant:**

Dans la configuration du paragraphe 3.1, pour une cible parfaitement réfléchissante, chaque couple  $(E, P_n)$ , où  $E$  est l'émetteur et  $P_n$  est l'un des capteurs de l'antenne, réalise une configuration bistatique du type de la figure 1. Chaque couple voit alors un point brillant  $M_n$  qui lui est propre. Tout se passe comme si le point brillant "glissait" le long de la surface de la position  $M_n$  à la position  $M_{n+1}$  en passant du capteur  $P_n$  au capteur  $P_{n+1}$ . Le champ mesuré sur chaque capteur  $P_n$  prend la forme:

$$U(P_n) = A_n e^{ik f_n} \quad (4)$$

avec  $A_n$  et  $f_n$  dépendant de  $P_n$ .  $k f_n$  est la phase de l'onde diffractée par le point brillant  $M_n$ .

**3.3 Rappels sur le traitement d'antenne**

La formation de voie sonar cherche à remettre en phase tous les signaux diffractés par un même point de l'espace. Elle se sert d'une modélisation des surfaces d'onde pour les ondes diffractées par ce point. Chaque capteur  $P_n$  est ainsi supposé

mesurer une phase  $f_n$ , phase de l'onde diffractée par ce point. La puissance du signal en sortie de voie est alors proportionnelle à:

$$G = \left| \sum_{n=1}^N U(P_n) e^{-ik f_n} \right|^2 \quad (5)$$

Lorsque les valeurs  $f_n$  ( $n=1, \dots, N$ ) utilisées pour la formation de voie ne sont pas égales aux valeurs vraies  $f_n$ , la focalisation de l'onde se fait mal et les performances de l'antenne sont dégradées. On peut évaluer les pertes de performances en calculant par exemple la perte de gain de directivité de l'antenne:

$$P_G = \frac{\left| \sum_n A_n e^{ik(f_n - \hat{f}_n)} \right|^2}{\left| \sum_n A_n \right|^2} \quad (6)$$

Ce type de phénomène de défocalisation est bien connu pour les cibles ponctuelles situées en champ proche (ou champ de Fresnel) de l'antenne, lorsque la formation de voie fait l'hypothèse erronée que la cible est située à l'infini (champ de Fraunhofer). L'effet de la méconnaissance du front d'onde est réputé ([5]) négligeable lorsque l'erreur sur la position du front d'onde vaut moins de  $\lambda/8$  ( $\lambda$ =longueur d'onde), c'est à dire dans le cas d'une cible ponctuelle située à distance finie de l'antenne lorsque la distance de la cible à l'antenne est supérieure à la distance dite de Fresnel:

$$D_F = \frac{L^2}{\lambda} \quad (7)$$

où  $L$  est la longueur de l'antenne.

**3.4 Cas particulier de la sphère:**

On s'intéresse au cas particulier où l'antenne est linéaire à capteurs équirépartis et où la cible est sphérique parfaitement réfléchissante avec son centre situé sur la médiatrice de

l'antenne. La figure 3 illustre la configuration et situe les points brillants pour les capteurs extrêmes de l'antenne.

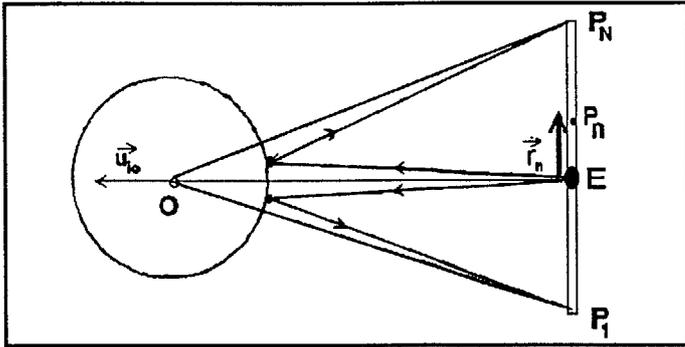


Figure 3: Configuration du cas particulier du paragraphe 3.4

Pour le capteur P<sub>n</sub> de l'antenne, d'après les formules (3), (4) et (5) et les remarques du paragraphe 2.3, le champ U(P<sub>n</sub>) est donné par les formules:

$$A_n = \frac{Aa}{2r_o^2} \left[ 1 + \alpha \left( \frac{a}{r_o} \right) \right] \left[ 1 + \alpha \left( \frac{r_n}{r_o} \right) \right] \quad (8-a)$$

et

$$f_n = 2(r_o - a) - r_n \cdot u_{k0} + \frac{1}{2r_o} \left[ 1 + \frac{a}{r_o} \right] |r_n \wedge u_{k0}|^2 \quad (8-b)$$

avec a rayon de la sphère, r<sub>n</sub> vecteur position du capteur

P<sub>n</sub> par rapport au centre de l'antenne, u<sub>k0</sub> vecteur direction de l'onde incidente normalisé à 1.

Si l'on suppose que l'onde est diffractée par une cible ponctuelle M<sub>0</sub> située sur la surface de la sphère au point brillant associé au couple (E,E) (configuration monostatique),

les valeurs f<sub>n</sub> (n=1,...,N) utilisées pour la formation de voie sont données par:

$$\hat{f}_n = 2(r_o - a) - r_n \cdot u_{k0} + \frac{1}{2r_o} \left[ 1 + \frac{a}{r_o} \right] |r_n \wedge u_{k0}|^2 \quad (8-c)$$

L'erreur de focalisation sur le nième capteur est alors donnée par la formule:

$$f_n - \hat{f}_n = - \frac{a}{4 r_o^2} |r_n \wedge u_{k0}|^2 \quad (9-a)$$

Cette erreur est maximale pour les capteurs extrêmes de l'antenne et vaut alors:

$$f_n - \hat{f}_n = - \frac{a L^2}{16 r_o^2} \quad (9-b)$$

L'erreur sur la position du front d'onde vaut ainsi moins de λ/8 lorsque r<sub>o</sub> est inférieure à la distance critique D<sub>c</sub> définie par:

$$D_c = \sqrt{\frac{a D_F}{2}} \quad (10)$$

En normalisant la distance sonar-cible r<sub>o</sub> par rapport à D<sub>c</sub>,

c'est à dire en posant x=r<sub>o</sub>/D<sub>c</sub>, lorsque le nombre de capteurs de l'antenne devient grand, on a:

$$P_G = 2 x^2 \left[ C^2 \left( \frac{1}{\sqrt{2} x} \right) + S^2 \left( \frac{1}{\sqrt{2} x} \right) \right] \quad (11)$$

où C() et S() sont les intégrales de Fresnel.

Le tracé de P<sub>G</sub> est donné figure 4.

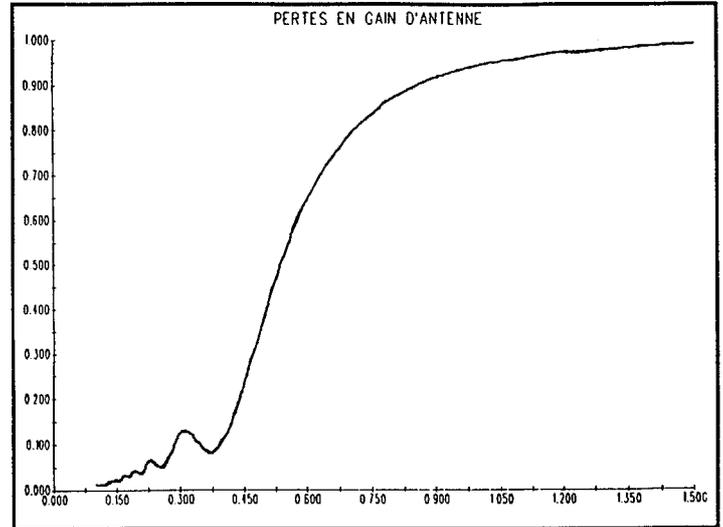


Figure 4: P<sub>G</sub> en fonction de x

Les diagrammes de directivité des antennes défocalisées correspondant à x =1 et x=0.5 sont donnés figures 5 et 6 respectivement. (Les axes des abscisses sont gradués en nombre de λ/L, largeur du lobe de directivité).

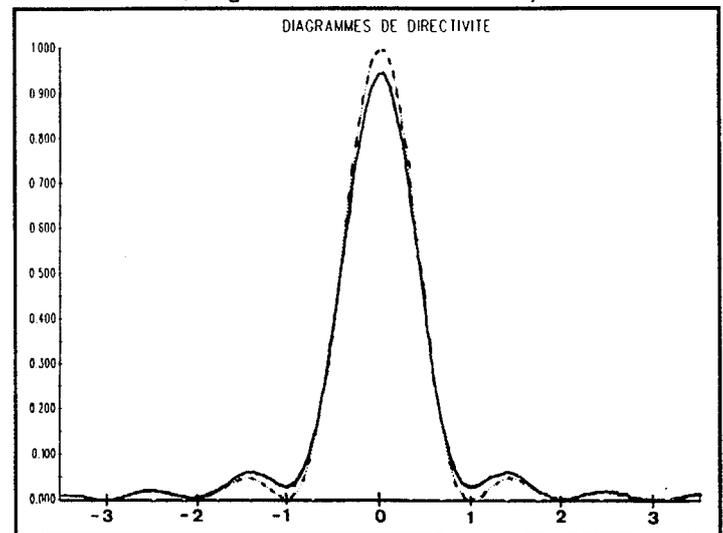


Figure 5: Diagramme de directivité pour x=1

### 3.5 Interprétation Physique et ordre de grandeur

La distance critique peut être vue comme la distance pour laquelle le glissement du point brillant le fait sortir du lobe de directivité de l'antenne. En effet lorsque r<sub>o</sub> >> L, la distance entre points brillants extrêmes vaut approximativement aL/2r<sub>o</sub>, et la largeur du lobe à cette distance vaut λr<sub>o</sub>/L.

De façon générale pour une distance sonar-cible comprise entre D<sub>c</sub> et D<sub>F</sub> l'approximation "cible ponctuelle" reste valable. L'évaluation de la distance critique permet ainsi de fixer une borne inférieure à la modélisation des cibles sous cette forme. Pour D<sub>F</sub> = 300m (sonar de type détecteur) et a = 1m, la distance critique vaut 12 mètres. 96% de la zone de Fresnel

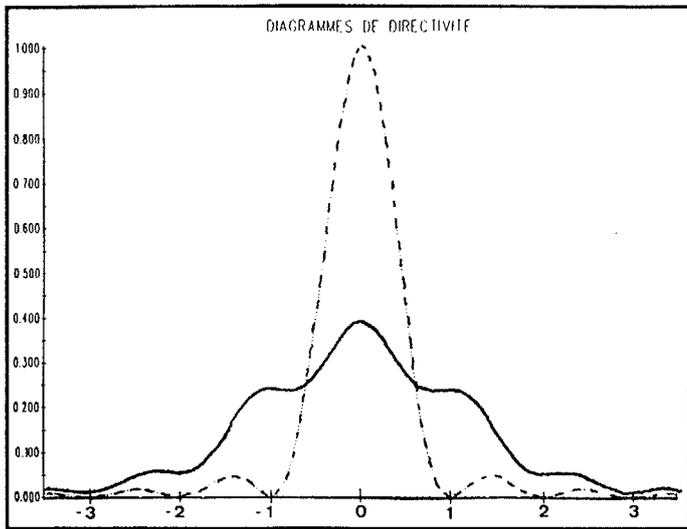


Figure 6: Diagramme de directivité pour  $x=0,5$

admet une modélisation de la sphère sous forme d'une cible ponctuelle.

Notons que l'effet d'échos différentiels n'est pas sensible sur les cibles de petites dimensions et en particulier sur les appendices.

#### 4. EFFETS D'OMBRES DIFFERENTIELS

##### 4.1 Principe d'utilisation des ombres

Les sonars classificateurs dont la configuration est la même que celle donnée à la figure 2, exploitent les ombres portées sur le fond marin à des fins d'identification des objets. L'ombre est produite par l'absence d'écho diffracté par le fond marin (réverbération de fond) derrière l'objet.

##### 4.2 Description du phénomène et distance critique

Un schéma simplifié (figure 7) illustre le glissement de l'ombre portée par un objet, lorsque l'on passe d'un capteur à l'autre.

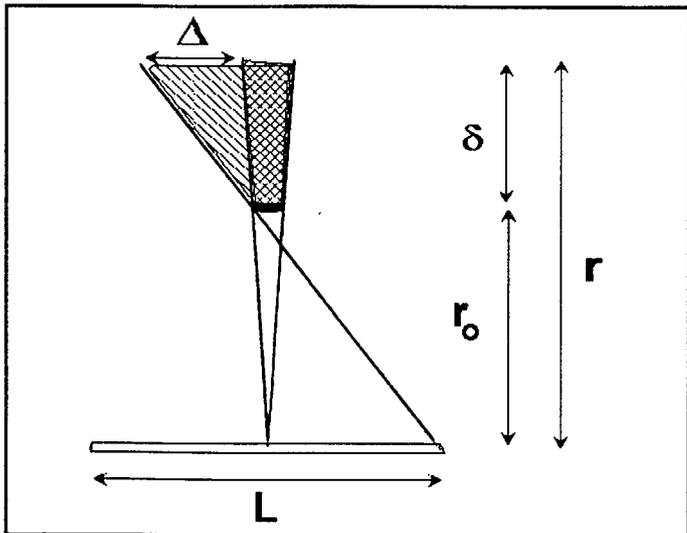


Figure 7: Effet d'ombres différentielles

On voit facilement que le bord de l'ombre vue par le capteur extrême à la distance  $r$  de l'antenne est différent du bord de l'ombre vue par le capteur central à la même distance. La distance  $\Delta$  qui les sépare est donnée par la formule:

$$\Delta = \frac{L}{2} \left[ \frac{r}{r_0} - 1 \right] \tag{12}$$

où  $r_0$  est la distance de l'objet à l'antenne.

On peut penser que, de même que pour l'effet d'échos différentiels, l'effet d'ombres différentielles sera sensible lorsque l'écart entre les bords d'ombres sera supérieur à la largeur d'une voie (ie  $r\lambda/L$  à la distance  $r$ ), c'est à dire lorsque:

$$D_F \geq \frac{2 r r_0}{r - r_0} \tag{13}$$

En supposant que l'objet est posé sur le fond et que son ombre a une profondeur  $\delta$  petite devant la distance sonar cible, on voit que les effets d'ombre vont intervenir lorsque la distance sonar-cible sera inférieure à la distance critique  $D_c$ :

$$D_c = \sqrt{\frac{D_F \delta}{2}} \tag{14}$$

Pour  $D_F = 3000m$ , ce qui correspond à certains sonars classificateurs actuels, et une ombre de 4 mètres de longueur la distance critique est de 74 mètres.

#### 5. CONCLUSION

Les effets d'échos et d'ombres différentiels sont sensibles en deçà de la distance critique qui est une fonction de la distance de Fresnel et de la taille de l'objet observé ou de son ombre. Cette distance permet de donner la "largeur" du point brillant ou du bord de l'ombre:

$$\sqrt{\frac{a\lambda}{2}} \quad \text{ou} \quad \sqrt{\frac{\delta\lambda}{2}}$$

Ainsi la largeur du point brillant pour une sphère de 1m de rayon et une fréquence de 200 KHz (sonar détecteur) est de 6cm. La largeur du bord d'ombre pour une ombre de 4m de long et une fréquence de 400 KHz (sonar classificateur) est de 9cm.

#### 6. REFERENCES

- [1] N. GESPA, "la diffusion acoustique", Imprimerie du CEDOCAR, Paris, 1987
- [2] S. BOZINOSKI, " Etude des effets d'échos différentiels sur une antenne d'imagerie acoustique de grande dimension", Rapport de DEA, ENSIEG, THOMSON-SINTRA Activité Sous-Marines.
- [3] R. WONG, "Asymptotic approximation of integrals", Academic Press, Inc., San Diego, California, 1989.
- [4] B.B. BAKER, E.T. COPSON, "The mathematical theory of Huygens' Principle", Oxford University Press, 1950.
- [5] M. BORN, E. WOLF, "Principles of Optics", Sixth edition, Pergamon Press, Oxford, UK, 1980