

B. HELFFER

Addition de variables et application à la régularité

Publications des séminaires de mathématiques et informatique de Rennes, 1976, fascicule 1

« Séminaires d'analyse fonctionnelle », , p. 1-12

http://www.numdam.org/item?id=PSMIR_1976__1_A10_0

© Département de mathématiques et informatique, université de Rennes, 1976, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la série « Publications mathématiques et informatiques de Rennes » implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
<http://www.numdam.org/>

ADDITION DE VARIABLES ET APPLICATION
A LA REGULARITE

(exposé aux journées d'équations aux dérivées partielles
de Rennes, Mai 1976)

par

B. HELFFER

Centre de Mathématiques de l'Ecole Polytechnique
Plateau de Palaiseau 91120 Palaiseau (France)

"Laboratoire de Recherche associé au C. N. R. S. n°169"

Introduction

On se propose de montrer dans cet exposé comment des théorèmes récents d'hypoellipticité ou de propagation des singularités peuvent être améliorés par la méthode d'addition de variables. Cette idée est due semble-t-il à [18]. Au paragraphe 1, nous montrons sur des exemples, quelle est la nature des généralisations que l'on peut obtenir. Au paragraphe 2, nous justifions et formalisons la méthode d'addition de variables.

§ 1. DES EXEMPLES

Exemple 1 [18], [8]

Pour construire une paramétrix pour l'opérateur $P = D_t^2 + t^2 D_x^2$, L. P. Rotschild et E. M. Stein utilisent la méthode suivante d'addition de variables.

On considère dans \mathbb{R}^3 l'opérateur $\tilde{P} = D_t^2 + (tD_x + D_z)^2$, cet opérateur est bien entendu hypoelliptique, et il est ici évident que l'hypoellipticité de \tilde{P} entraîne celle de P . Mais la préoccupation des auteurs était autre. L'espace vectoriel engendré en chaque point de \mathbb{R}^2 par D_t et tD_x n'est pas de dimension constante, alors que celui engendré en chaque point de \mathbb{R}^3 par D_t et $(tD_x + D_z)$ est de dimension constante égale à 2. \tilde{P} peut alors être considéré comme un élément de l'algèbre enveloppante du groupe de Heisenberg. \tilde{P} admet une paramétrix "homogène", dont on déduit une paramétrix pour P . Il est clair que, dans l'exemple considéré, on n'avait pas besoin d'utiliser un tel arsenal [10], mais la même méthode [18] [8] permet d'obtenir des paramétrixes pour les opérateurs du type de Hörmander [13] :

$\sum_{j=1}^p X_j^2 + X_0$, vérifiant la condition suffisante d'hypoellipticité.

Exemple 2 [11]

Soit X un ouvert de \mathbb{R}^n , $T^*X \setminus 0$ le fibré cotangent privé de l'origine, on note (x, ξ) les coordonnées dans $T^*X \setminus 0$.

On considère l'opérateur pseudo-différentiel dans X

$$P = P_1 P_2 + Q$$

où P_j ($j=1,2$) est un opérateur pseudo-différentiel régulier d'ordre 1 dont le symbole principal p_j , dont l'ensemble caractéristique est désigné par Σ_j , vérifie la condition :

$$(H\delta) \quad \frac{1}{i} \{p_j, \bar{p}_j\} < 0 \quad \text{sur } \Sigma_j, \quad j=1,2.$$

L'hypothèse (H δ) entraîne [12] que P_1 et P_2 sont hypoelliptiques avec perte d'1/2 dérivée.

Lorsque Σ_1 et Σ_2 sont transverses, c'est-à-dire que $\Sigma_1 \cap \Sigma_2$ est une sous-variété C^∞ de $T^*X \setminus 0$, telle que $T_\rho(\Sigma_1 \cap \Sigma_2) = T_\rho \Sigma_1 \cap T_\rho \Sigma_2$ en tout point ρ de $\Sigma_1 \cap \Sigma_2$ et telle que $\text{codim}(\Sigma_1 \cap \Sigma_2) = \text{codim} \Sigma_1 + \text{codim} \Sigma_2$, on montre [11] qu'on peut construire une paramétrix à gauche pour P , dans une classe d'opérateurs pseudo-différentiels adaptée, dérivée des classes de Boutet de Monvel [4].

Lorsque Σ_1 et Σ_2 ne sont pas transverses, on utilise la méthode suivante. On considère dans $X \times \mathbb{R}^2 \ni (x, z_1, z_2)$

$$\tilde{P} = (P_1 + D_{z_1} + i D_{z_2})(P_2) + Q$$

Cet opérateur est bien défini (modulo C^∞) sur les distributions ayant un spectre singulier (wave front) proche de $\zeta_1 = 0$, $\zeta_2 = 0$, en particulier les distributions qui ne dépendent pas de z_1 et z_2 . On a pris ici comme coordonnées de $T^*(X \times \mathbb{R}^2)$: $(x, z_1, z_2, \xi, \zeta_1, \zeta_2)$.

Ecrivons \tilde{p} sous la forme :

$$\tilde{p} = \tilde{P}_1 \cdot \tilde{P}_2 + \tilde{Q}$$

$$\text{avec } \tilde{P}_1 = P_1 + D_{z_1} + i D_{z_2}$$

$$\tilde{P}_2 = P_2$$

$$\tilde{Q} = Q$$

On désigne par $\tilde{\Sigma}_j$ ($j = 1, 2$) l'ensemble caractéristique du symbole principal \tilde{p}_j de \tilde{P}_j ; on vérifie aisément que $\tilde{\Sigma}_1$ et $\tilde{\Sigma}_2$ sont transverses, et que \tilde{p}_j ($j = 1, 2$) vérifie (HB) lorsque $|\zeta_1| \leq \varepsilon |\xi|$, $|\zeta_2| \leq \varepsilon |\xi|$ pour ε assez petit.

Le théorème précédent nous donne l'existence d'une paramétrix microlocale \tilde{Q} pour \tilde{p} dont le symbole complet $\tilde{q}(x, \xi, \zeta_1, \zeta_2)$ est indépendant de z_1, z_2 .

Alors $\tilde{q}(x, \xi, 0, 0)$ est le symbole de la paramétrix Q de P (tout est ici microlocal).

Exemple 3 : Soit à étudier l'hypoellipticité dans \mathbb{R}^2 de l'opérateur

$$P = D_t^2 + t^4 D_x^2 + \lambda D_x$$

Dans [6] on a construit des paramétrixes pour des opérateurs pseudo-différentiels dont le symbole principal s'annule exactement à l'ordre 2 sur un cône lisse Σ . L'opérateur ci-dessus ne vérifie pas cette hypothèse, mais on va se ramener à la situation considérée dans cet article en ajoutant des variables.

On considère dans \mathbb{R}^3

$$\tilde{P} = D_t^2 + (t^2 D_x + D_z)^2 + \lambda D_x .$$

On va étudier son hypoellipticité dans un voisinage conique (dans $T^*\mathbb{R}^3 \setminus 0$) d'un point $\tilde{p} = (x, t=0, z=0, \xi, \tau=0, \zeta=0)$. On pose $\rho = (x, t=0, \xi, \tau=0)$.

Il est montré dans [6], que sous une condition $C_{\tilde{\rho}}$ sur \tilde{P} , il existe un voisinage conique $\tilde{\Gamma}_{\tilde{\rho}}$ du point $\tilde{\rho} = (\rho, 0, 0)$ dans lequel \tilde{P} admet une paramétrix à gauche \tilde{Q} . On entend par là, que pour tout opérateur pseudo-différentiel régulier $\tilde{\chi}$ dont le symbole est à support dans $\tilde{\Gamma}_{\tilde{\rho}}$, on a

$$\tilde{\chi} \cdot \tilde{Q}\tilde{P} \equiv \tilde{\chi} \text{ (modulo un opérateur régularisant)}$$

On en déduit comme dans l'exemple 2 une paramétrix à gauche Q pour P dans un voisinage conique Γ_{ρ} du point ρ dans $T^*\mathbb{R}^2 \setminus 0$.

La condition $C_{\tilde{\rho}}$ s'écrit :

$$\tau^2 + t^4 + \lambda \left| \frac{\tau}{\xi} \right| \neq 0, \quad \forall \tau, \forall t$$

On vérifie que cette condition est nécessaire [14] pour avoir l'hypoellipticité avec perte d'une dérivée. L'hypoellipticité est également montrée dans [14] par des méthodes d'inégalités microlocalisées. Les résultats de R. Beals [1] permettent de déduire de l'existence d'inégalités a priori, l'existence d'une paramétrix dans une classe de Beals. Ici nous proposons une méthode de démonstration différente, moins générale par certains côtés, qui donne également l'existence d'une paramétrix dans une classe de Beals. Son avantage est de "sortir" plus explicitement des conditions suffisantes d'hypoellipticité. Pour montrer quel type de résultats plus généraux on peut obtenir, citons seulement le théorème suivant, cas particulier d'un théorème de Radkevič [17] [14].

Théorème : Soit P un opérateur pseudo-différentiel régulier dont le symbole principal p_m se décompose sous la forme suivante :

$$p_m = \sum_{i=1}^{\nu} q_i^2$$

où les q_i sont réels C^{∞} homogènes de degré $m/2$. On suppose que le symbole sous principal p'_{m-1} n'est pas réel $\neq 0$. Alors les conditions suivantes sont équivalentes

- i) P admet une paramétrix donnant l'hypoellipticité avec perte d'une dérivée .
- ii) En tout point caractéristique, ou bien $p'_{m-1} \neq 0$ ou bien l'application hamiltonienne du hessien de p_m (matrice fondamentale) n'est pas nilpotente.

Exemple 4 : Propagation des singularités pour des opérateurs de type principal .

Soit P un opérateur pseudo-différentiel régulier d'ordre 1 dans $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ dont le symbole principal p vérifie :

$$\begin{aligned} \{ \text{Re } p, \text{Im } p \} &= 0 & \text{sur } \text{Re } p &= 0 \\ & & \text{Im } p &= 0 \end{aligned}$$

On suppose que $d \text{Re } p$, $d \text{Im } p$ et $\sum_{i=1}^n \xi_i dx_i$ sont indépendants ; alors p s'annule exactement à l'ordre 1 sur un cône involutif Σ de codimension 2 obtenu comme intersection de deux cônes involutifs Σ_1 et Σ_2 de codimension 1 qui sont les ensembles caractéristiques de $\text{Re } p$ et $\text{Im } p$.

Si ρ est un point de Σ , on désigne par $\Gamma_\rho \subset \Sigma$ l'ensemble obtenu en intégrant successivement le long de $H_{\text{Re } p}$ et $H_{\text{Im } p}$ à partir du point ρ . Localement, Γ_ρ est une sous-variété de dimension 2 de Σ . Le résultat suivant est alors bien connu [7] .

Si $u \in \mathcal{D}'(\Omega)$, $Pu \in C^\infty(\Omega)$ et $\rho \in \text{WF}(u)$, alors $\Gamma_\rho \subset \text{WF}(u)$.

On se pose la question de savoir ce qui se passe lorsque $H_{\text{Re } p}$ et $H_{\text{Im } p}$ deviennent collinéaires.

Cas 1 : On suppose que $\text{Re } p$ s'annule à l'ordre 1 sur une surface Σ_1 et que $\text{Im } p$ s'annule à l'ordre k exactement ($k > 1$) sur une surface Σ_2 de codimension 1. Si $u = 0$ est une équation de Σ_2 (u homogène de degré $\frac{1}{k}$), on a $\text{Im } p = a \cdot u^k$ où a est elliptique d'ordre 0. On suppose que $\Sigma_1 \cap \Sigma_2$ est involutive et que du , $d \text{Re } p$ et $\sum_{i=1}^n \xi_i dx_i$ sont indépendants. Quitte à multiplier p par un symbole elliptique, on se ramène [9] au cas où :

$$p = \text{Re } p + i a \cdot u^k$$

et

$$\{ \text{Re } p, u \} = 0 \text{ partout .}$$

On pose alors $\tilde{p} = \text{Re } p + i a(u^k + \zeta)$ et l'opérateur \tilde{P} dont le symbole complet est défini par :

$$(\text{si } \sigma(P) \sim p + p_0 + p_{-1} + \dots)$$

$$\sigma(\tilde{P}) \sim \tilde{p} + p_0 + p_{-1} + \dots)$$

vérifie les hypothèses du théorème précédent au voisinage de $\zeta = 0$. On déduit alors du résultat de propagation pour \tilde{P} , un résultat de propagation pour P le long des courbes intégrales de $H_{\text{Re } p}$.

Cas 2 : Si on suppose que $H_{\text{Re } p}$ et $\sum_{i=1}^n \varepsilon_i \frac{\partial}{\partial \varepsilon_i}$ sont indépendants

$H_{\text{Im } p}$ et $\sum_{i=1}^n \xi_i \frac{\partial}{\partial \xi_i}$ sont indépendants

$$\{\text{Re } p, \text{Im } p\} = 0 \quad \text{partout}^*$$

alors on obtient, en considérant $\tilde{P} = P + i D_z$ dans $\Omega \times \mathbb{R}$, opérant microlocalement au voisinage de $\zeta = 0$, et le théorème de propagation pour \tilde{P} , le résultat de propagation suivant :

Soit ρ un point où $\text{Re } p = 0$, $\text{Im } p = 0$; on désigne par Γ_ρ l'ensemble obtenu en intégrant successivement le long de $H_{\text{Re } p}$ et $H_{\text{Im } p}$ à partir de ρ . Γ_ρ n'est plus nécessairement une sous-variété de dimension 2.

Alors si $u \in \mathcal{D}'(\Omega)$, $Pu \in C^\infty(\Omega)$ et $\rho \in \text{WF}(u)$, alors $\Gamma_\rho \in \text{WF}(u)$.

* Plus généralement, on peut supposer : $\{\text{Re } p, \text{Im } p\} = a \text{Re } p + b \text{Im } p$ (a, b d'ordre 0).

Généralisations possibles

Utilisant les travaux de [2], [3], [5], [15], [19], on peut obtenir des résultats analogues de propagation C^∞ ou analytique selon les cas pour des classes du type suivant ;
on considère ν -sous-variétés involutives $\Sigma_1, \dots, \Sigma_\nu$ de codimension 1 de $T^*\Omega \setminus 0$ transverses et telles que $\Sigma_i \cap \Sigma_j$ soit involutive ($i = 1, \dots, \nu$; $j = 1, \dots, \nu$). Localement, cela signifie qu'au voisinage d'un point de $\Sigma = \bigcap_i \Sigma_i$ il existe ν fonctions réelles homogènes de degré 0 $u_i(x, \xi)$ ($i = 1, \dots, \nu$) telles que

- . Σ_i est définie par $u_i = 0$
- . les du_i ($i = 1, \dots, \nu$) et $\sum_{i=1}^n \varepsilon_i dx_i$ sont indépendantes
- . $\{u_i, u_j\} = 0$ sur $u_i = 0, u_j = 0$

On sait alors [9] qu'on peut choisir les u_i de telle sorte que $\{u_i, u_j\} = 0$ partout.

Soient $\vec{k} = (k_1, \dots, k_p, k_{p+1}, \dots, k_\nu)$ des entiers ≥ 1 , et on suppose que :

$$\begin{aligned} k_i &= 1 && \text{pour } i = 1, \dots, p \\ k_i &> 1 && \text{pour } i = p+1, \dots, \nu \end{aligned}$$

Soient U_i des o.p.d réguliers de symbole principal u_i , et on considère des opérateurs pseudo-différentiels réguliers d'ordre $m+m'$ qui s'écrivent sous la forme :

$$P = \sum_{|\alpha| \leq m} A_\alpha U_1^{k_1 \alpha_1} \dots U_\nu^{k_\nu \alpha_\nu}$$

où A_α est un opérateur pseudo-différentiel régulier d'ordre $m' + \sum |\alpha_i|$.

(Dans le cas analytique, on ne fait pas d'hypothèse sur les termes d'ordre inférieur ou égal à $m+m' - 1$; dans le cas C^∞ , par contre, une condition de Levi est à imposer, sauf dans les cas considérés dans [5] et [15] qui sont de nature différente).

Alors, on laisse au lecteur le soin d'adapter les conditions de [2], [19] pour obtenir de la propagation dans Γ_ρ , où Γ_ρ est l'ensemble obtenu en intégrant successivement le long de H_{u_1}, \dots, H_{u_p} à partir de ρ . A partir de [2], on obtient par exemple certains cas particuliers de résultats de [3].

Exemple 5 : Propagation des singularités pour des opérateurs caractéristiques sur la réunion de deux hypersurfaces, cas non transverse

Dans [16], [20], il est démontré le théorème suivant :
Soit P_i ($i = 1, 2$) un opérateur pseudo-différentiel régulier d'ordre 1 dont le symbole principal est réel et s'annule exactement à l'ordre 1 sur Σ_i . On suppose que $\Sigma = \Sigma_1 \cap \Sigma_2$ est involutive. Soit Q_i ($i = 1$ à 3) des opérateurs pseudo-différentiels réguliers d'ordre 0 et on considère l'opérateur :

$$P = P_1 \cdot P_2 + Q_1 P_1 + Q_2 P_2 + Q_3 .$$

Si ρ appartient à Σ_i , on désigne par Γ_ρ^i la bicaractéristique issue de ρ associée à H_{P_i} .

Alors soit $\rho \in \Sigma \cap \text{WF}(u)$ et $V(\rho)$ un voisinage de ρ tel que $V(\rho) \cap \text{WF}(\hat{p}u) = \emptyset$. Alors localement l'une des bicaractéristiques Γ_ρ^1 ou Γ_ρ^2 est encore dans $\text{WF}(u)$.

La méthode d'addition de variable permet de montrer le même résultat sous les hypothèses suivantes :

$$1) \quad dp_1 \text{ et } \sum_{i=1}^n \xi_i dx_i \quad \text{indépendants}$$

$$2) \quad dp_2 \text{ et } \sum_{i=1}^n \xi_i dx_i \quad \text{indépendants}$$

$$3) \quad \{p_1, p_2\} = ap_1 + bp_2 \quad (a, b \text{ d'ordre } 0)$$

(Il existe alors deux symboles elliptiques d'ordre 0, α et β tels que $\{\alpha p_1, \beta p_2\} = 0$ partout).

§ 2. LA METHODE D'ADDITION DE VARIABLES

Elle est basée sur les deux remarques suivantes.

Remarque 1 : Soit Ω un ouvert de \mathbf{R}^n de point courant x . Soit $u \in \mathcal{S}'(\Omega)$, $\mathbf{R}^p \ni z$; alors u définit de manière évidente une distribution \tilde{u} sur $\Omega \times \mathbf{R}^p$ vérifiant :

$$\frac{\partial}{\partial z_i} \tilde{u} = 0 \quad i = 1, \dots, p$$

On en déduit que

$$\text{WF} \tilde{u} = (\text{WF} u) \times \mathbf{R}_z^p \times \{0\} \quad \text{dans } T^*(\Omega \times \mathbf{R}^p \setminus 0)$$

Ainsi si $\rho \notin \text{WF} u$, $(\rho, z, \zeta) \notin \text{WF}(\tilde{u}) \quad \forall z, \forall \zeta$
 $\rho \in \text{WF} u$, $(\rho, z, 0) \in \text{WF}(\tilde{u}) \quad \forall z.$

Remarque 2 : Soit \tilde{P} un opérateur pseudo-différentiel dans $\Omega \times \mathbb{R}^p$ de symbole $\tilde{p}(x, \xi, \zeta)$ indépendant de z contenu dans une classe "microlocale", par exemple $\bigcup_m OPS_{1/2, 1/2}^m(\Omega \times \mathbb{R}^p)$.

Soit $u \in \mathcal{D}'(\Omega)$, alors

$$\tilde{P} \cdot \tilde{u} \equiv (\tilde{P}u)$$

où P est l'opérateur pseudo-différentiel de symbole $\tilde{p}(x, \xi, 0)$, \equiv signifie modulo C^∞ .

Etude de l'hypoellipticité

On veut étudier l'hypoellipticité d'un opérateur P dans Ω , connaissant un prolongement \tilde{P} de P dans $\Omega \times \mathbb{R}^p$ et l'hypoellipticité microlocale de \tilde{P} au voisinage d'un point $(x, \xi, 0, 0)$ de $T^*(\Omega \times \mathbb{R}^p) \setminus \{0\}$.

Par prolongement, on entend l'existence (microlocale) d'un symbole $\tilde{p}(x, \xi, \zeta)$ indépendant de z pour l'opérateur \tilde{P} , dans $\bigcup_m S_{1/2, 1/2}^m(\Omega \times \mathbb{R}^p)$ tel que :

$$\tilde{p}(x, \xi, 0) = p(x, \xi) \text{ où } p \text{ est le symbole de } P.$$

Soit $u \in \mathcal{D}'(\Omega)$, $\rho \in T^*\Omega \setminus \{0\}$ et on suppose que $\rho \notin WF(Pu)$; on veut en déduire que $\rho \notin WF(u)$.

Si $\rho \notin WF(Pu)$, il en résulte que $(\rho, 0, 0) \notin WF(\tilde{P}u)$ (Remarque 1), d'où $(\rho, 0, 0) \notin WF(\tilde{P} \cdot \tilde{u})$ (remarque 2). On en déduit (hypoellipticité de \tilde{P}) que $(\rho, 0, 0) \notin WF(\tilde{u})$ et par conséquent (Remarque 1), $\rho \notin WFu$.

L'hypoellipticité microlocale est ainsi montrée.

Propagation des singularités

On désigne par $V(\rho)$ un voisinage conique d'un point ρ de $T^*\Omega \setminus \{0\}$. Soit $u \in \mathcal{D}'(\Omega)$, $\rho \in T^*\Omega \setminus \{0\}$, et on suppose que :

$$\rho \in WF(u), \quad V(\rho) \cap WF(Pu) = \emptyset.$$

Alors $(\rho, 0, 0) \in WF(\tilde{u})$ et $V(\rho) \times \mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^p \cap WF(\tilde{P} \cdot \tilde{u}) = \emptyset$ d'où

$$\left[\begin{array}{l} (\rho, 0, 0) \in \text{WF}(\tilde{u}) \\ V(\rho) \times \mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^p \cap \text{WF}(\tilde{P}.\tilde{u}) = \emptyset \end{array} \right. .$$

Supposons qu'un théorème de propagation des singularités pour \tilde{P} nous donne qu'un ensemble de $T^*\Omega \setminus 0 \times \mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^p$, $\tilde{\Gamma}(\rho, 0, 0)$ est contenu dans $\text{WF}(\tilde{u})$; alors par projection par $\pi : (x, \xi, z, \zeta) \rightarrow (x, \xi)$, on obtient que $\Gamma_\rho = \pi(\tilde{\Gamma}(\rho, 0, 0))$ est contenu dans $\text{WF}(u)$. On raisonne de même pour la propagation de la régularité.

Construction de paramétrixes

On suppose que dans un voisinage conique de $(\rho, 0, 0) : \tilde{V}(\rho) = V(\rho) \times W(0, 0)$ (où $V(\rho)$ est un voisinage conique de ρ dans $T^*\Omega \setminus 0$), il existe une paramétrix \tilde{Q} dans $\text{OPS}_{1/2, 1/2}^m(\Omega \times \mathbb{R}^p)$ indépendante de z pour \tilde{P} . C'est à dire que :

$$\tilde{Q}.\tilde{P} \equiv I + \tilde{R}$$

et, quelque soit $\tilde{\chi}$ dans $\text{OPS}^0(\Omega \times \mathbb{R}^p)$ à support dans $\tilde{V}(\rho)$, $\tilde{\chi}.\tilde{R}$ est régularisant .

En faisant opérer sur \tilde{u} , on obtient :

$$\tilde{Q} \tilde{P} \tilde{u} \equiv \tilde{u} + \tilde{R} \tilde{u}$$

$$\widetilde{QPu} \equiv \tilde{u} + \tilde{R} \tilde{u}$$

$$\text{d'où } QP \equiv I + R$$

où Q est l'opérateur pseudo-différentiel de symbole $q = \tilde{q}(x, \xi, 0)$, R vérifie la propriété suivante : quelque soit χ dans $\text{OPS}^0(\Omega)$ à support dans $V(\rho)$, χR est régularisant. Q est donc une paramétrix pour P dans $V(\rho)$ et on vérifie facilement que si \tilde{Q} est dans $\text{OPS}_{1/2, 1/2}^m(\Omega \times \mathbb{R}^p)$ Q est dans $\text{OPS}_{1/2, 1/2}^m(\Omega)$.

Conclusion

La méthode d'addition de variables permet donc, comme on l'a vu sur des exemples, de "désingulariser" certaines situations. Elle est cependant limitée pour les deux raisons suivantes :

- 1) Dans le cas de l'hypoellipticité, elle ne donne que des conditions suffisantes, d'autant moins bonnes que le prolongement \tilde{P} est mauvais.
- 2) Elle est liée à l'existence d'un opérateur de prolongement \tilde{P} , ce qui limite son champ d'application.

REFERENCES

- (1) R. Beals : Caractérisation d'opérateurs pseudo-différentiels et applications (à paraître).
- (2) J. M. Bony, P. Schapira : Propagation des singularités analytiques pour les solutions des équations aux dérivées partielles Annales de l'Institut Fourier 26.1. (1976) p.81-140.
- (3) J. M. Bony : Extensions du théorème d'Holmgren ; Séminaire Goulaouic-Schwartz, exposé n°17 (1975-76).
- (4) L. Boutet de Monvel : Hypoelliptic operators with double characteristics and related pseudo-differential operators. Comm. Pure Appl. Math. 27 p.585-639 (1974).
- (5) L. Boutet de Monvel : Propagation des singularités des solutions d'équations analogues à l'équation de Schrödinger. Proceedings of Conference of F.I.O. Nice (1974), Springer Lecture Notes.
- (6) L. Boutet de Monvel, A. Grigis, B. Helffer : Paramétrixes d'opérateurs pseudo-différentiels à caractéristiques multiples. Astérisque 1976 .
- (7) J. J. Duistermaat, L. Hörmander : Fourier intégral operators II Acta Math. 128 (1972) p. 183-269.
- (8) R. Goodman : Lifting vector fields to nilpotent Lie groups. A paraître.
- (9) A. Grigis, R. Lascar : Equations locales des sous-variétés involutives. Note aux C. R. Acad. Sc. (1976).
- (10) V. V. Grušin : On a class of elliptic pseudo-differential operators degenerate on a submanifold. Mat. Sbornik Tom 84 (126) (1971) n° 2, p. 163-195, Math USSR Sbornik 13 (1971) n° 2 p. 155-185.
- (11) B. Helffer : Construction de paramétrixes pour des opérateurs pseudo-différentiels caractéristiques sur la réunion de deux cônes lisses. A paraître.

- (12) L. Hörmander : Pseudo differential operators and non elliptic boundary problems. Ann. of Math. 83 (1966) p. 129-209.
 - (13) L. Hörmander : Hypoelliptic second order equations. Acta Math. vol. 119, 1967, p.147-161.
 - (14) L. Hörmander : A class of hypoelliptic pseudo differential operators with double characteristics. Mathematische Annalen 217 n^o 2 (1975).
 - (15) R. Lascar : Propagation des singularités des solutions d'équations quasi-homogènes. Annales de l'Institut Fourier (à paraître 1977).
 - (16) R. Lascar : Propagation des singularités pour une classe d'opérateurs pseudo différentiels à caractéristiques de multiplicité variable. Note aux C. R. Acad. Sc. 1976.
 - (17) E. V. Radkevič : A priori estimates and hypoelliptic equations with multiple characteristics. Dokl. Akad. Nauk. SSSR 187 (1969) p. 274-277. Soviet Math. Doklady 10 (1969) 849-853.
 - (18) L. P. Rotschild, E. M. Stein : Hypoelliptic differential operators and nilpotent groups (à paraître).
 - (19) J. Sjöstrand : Propagation of singularities for operators with multiple involutive characteristics. Report n^o 11, Inst. Mittag Leffler (Sweden) 1975 .
 - (20) C. Uhlmann : Thèse M. I. T. (à paraître).
-