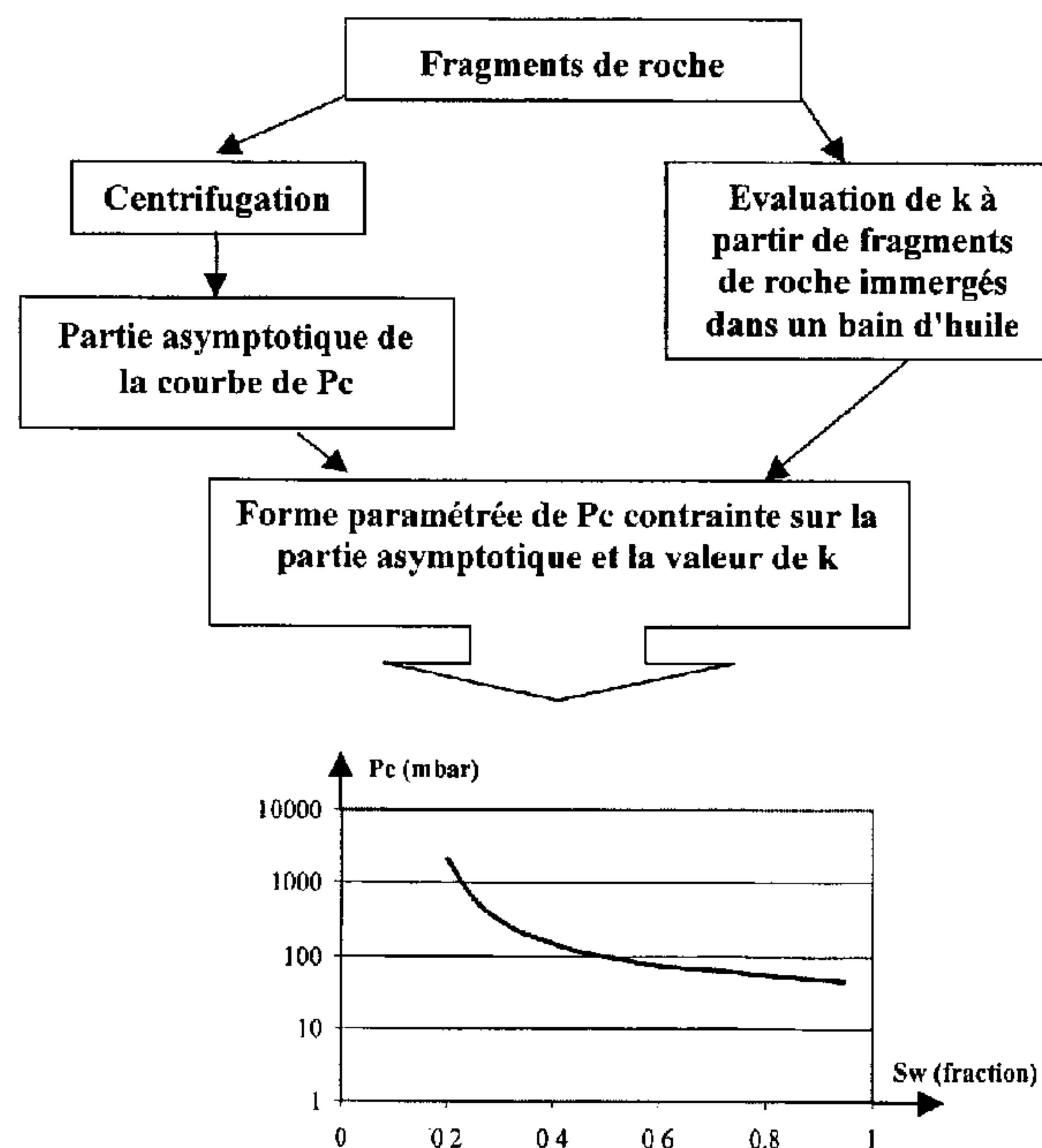




(86) Date de dépôt PCT/PCT Filing Date: 2003/05/14  
 (87) Date publication PCT/PCT Publication Date: 2003/11/27  
 (45) Date de délivrance/Issue Date: 2009/07/14  
 (85) Entrée phase nationale/National Entry: 2004/10/18  
 (86) N° demande PCT/PCT Application No.: FR 2003/001456  
 (87) N° publication PCT/PCT Publication No.: 2003/098196  
 (30) Priorité/Priority: 2002/05/15 (FR02/06003)

(51) Cl.Int./Int.Cl. *G01N 15/08* (2006.01),  
*G01N 33/24* (2006.01), *G01N 7/04* (2006.01)  
 (72) Inventeurs/Inventors:  
LENORMAND, ROLAND, FR;  
EGERMAN, PATRICK, FR;  
LONGERON, DANIEL, FR  
 (73) Propriétaire/Owner:  
INSTITUT FRANCAIS DU PETROLE, FR  
 (74) Agent: ROBIC

(54) Titre : METHODE D'EVALUATION DE LA COURBE DE PRESSION CAPILLAIRE DES ROCHES D'UN GISEMENT SOUTERRAIN A PARTIR DE MESURES SUR DES DEBRIS DE ROCHE  
 (54) Title: METHOD FOR EVALUATING CAPILLARY PRESSURE CURVE OF AN UNDERGROUND DEPOSIT ROCKS BASED ON ROCK CUTTINGS MEASUREMENTS



(57) **Abrégé/Abstract:**

Méthode d'évaluation de la courbe de pression capillaire de roches d'un gisement souterrain à partir de mesures sur des débris ou fragments de roche tels que des débris de forage qui en proviennent, sur tout l'intervalle de saturation de ces roches, ceci dans un délai réduit et à moindre coût à partir de ces mesures. Elle comporte essentiellement une mesure de la perméabilité  $k$  des débris de roche, une mesure de la courbe de pression capillaire  $P_c$  en fonction de la saturation de ces fragments initialement saturés d'un fluide (de la saumure par exemple) en les soumettant à une centrifugation, et le paramétrage d'une courbe de pression capillaire  $P_c$  satisfaisant à des relations empiriques dépendant de paramètres ajustables, que l'on contraint à s'ajuster à une partie asymptotique de la courbe capillaire mesurée par centrifugation, et à la valeur de la perméabilité  $k$  mesurée sur les débris de forage, de façon à obtenir l'ensemble de la courbe de pression capillaire. Applications à l'évaluation d'un gisement en hydrocarbures par exemple.

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION  
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)(19) Organisation Mondiale de la Propriété  
Intellectuelle  
Bureau international(43) Date de la publication internationale  
27 novembre 2003 (27.11.2003)

PCT

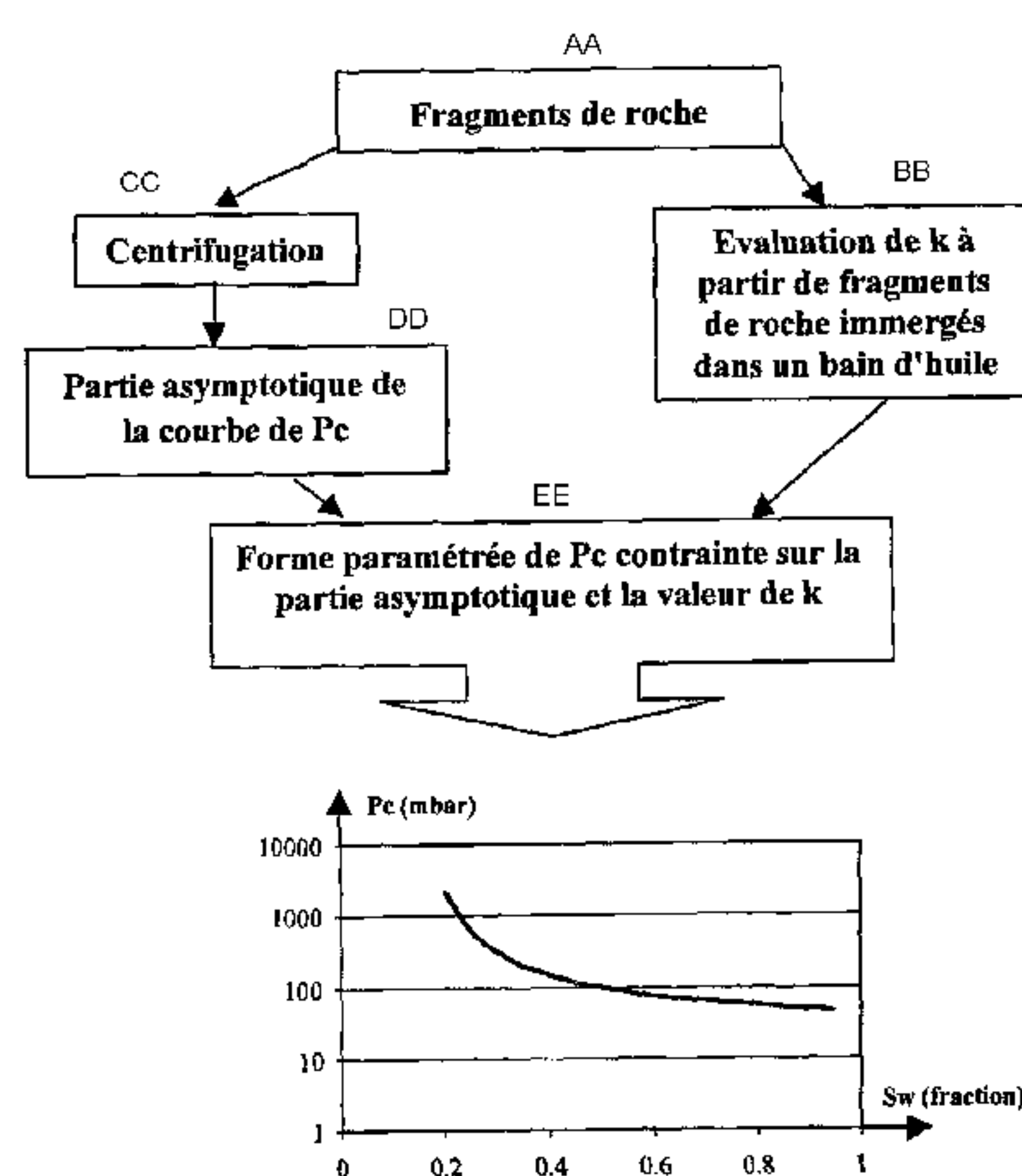
(10) Numéro de publication internationale  
WO 03/098196 A1

- (51) Classification internationale des brevets<sup>7</sup> :  
G01N 15/08, 33/24
- (21) Numéro de la demande internationale :  
PCT/FR03/01456
- (22) Date de dépôt international : 14 mai 2003 (14.05.2003)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité :  
02/06003 15 mai 2002 (15.05.2002) FR
- (71) Déposant (*pour tous les États désignés sauf US*) : **INSTITUT FRANCAIS DU PETROLE** [FR/FR]; 1 et 4, Avenue de Bois Préau, F-92852 Rueil Malmaison Cedex (FR).
- (72) Inventeurs; et
- (75) Inventeurs/Déposants (*pour US seulement*) : **LENORMAND, Roland** [FR/FR]; 31, avenue Gabriel Péri,
- F-92500 Rueil-Malmaison (FR). **EGERMAN, Patrick** [FR/FR]; 6, avenue Alsace Lorraine, Bâtiment K, F-92500 Rueil-Malmaison (FR). **LONGERON, Daniel** [FR/FR]; 147, rue Lamartine, F-78500 Sartrouville (FR).
- (74) Mandataire : **ELMALEH, Alfred**; Institut Français du Pétrole, 1 et 4, avenue Bois Préau, F-92852 Rueil-Malmaison Cedex (FR).
- (81) États désignés (*national*) : AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VN, YU, ZA, ZM, ZW.
- (84) États désignés (*régional*) : brevet ARIPO (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), brevet

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: METHOD FOR EVALUATING CAPILLARY PRESSURE CURVE OF AN UNDERGROUND DEPOSIT ROCKS BASED ON ROCK CUTTINGS MEASUREMENTS

(54) Titre : METHODE D'EVALUATION DE LA COURBE DE PRESSION CAPILLAIRE DES ROCHES D'UN GISEMENT SOUTERRAIN A PARTIR DE MESURES SUR DES DEBRIS DE ROCHE



AA... ROCK FRAGMENTS  
 BB... EVALUATING K BASED ON ROCK FRAGMENTS IMMERSSED IN AN OIL BATH  
 CC... CENTRIFUGING  
 DD... ASYMPTOTIC PORTION OF CURVE PC  
 EE... PARAMETERIZED FORM OF PC CONSTRAINED ON THE ASYMPTOTIC PORTION AND THE VALUE OF K

(57) Abstract: The invention concerns a method for evaluating the capillary pressure curve of an underground deposit rocks based on measurements of rock cuttings or fragments such as drill cuttings derived therefrom, over the entire saturation interval of said rocks, in reduced time and at less cost based on said measurements. The method essentially consists in: measuring the permeability  $k$  of the rock cuttings, measuring the capillary pressure curve  $P_c$  based on the saturation of said fragments initially saturated with a fluid (for example brine) by subjecting them to centrifuging, and parameterizing a capillary pressure curve  $P_c$  satisfying empirical relationships depending on adjustable parameters, which are constrained to be adjusted to an asymptotic portion of the capillary curve measured by centrifuging, and to the value of permeability measured on the drill cuttings, so as to obtain the complete capillary pressure curve. The invention is applicable to evaluation of a hydrocarbon deposit for example.

[Suite sur la page suivante]

WO 03/098196 A1



eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), brevet européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), brevet OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

*En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.*

**Publiée :**

— avec rapport de recherche internationale

---

**(57) Abrégé :** Méthode d'évaluation de la courbe de pression capillaire de roches d'un gisement souterrain à partir de mesures sur des débris ou fragments de roche tels que des débris de forage qui en proviennent, sur tout l'intervalle de saturation de ces roches, ceci dans un délai réduit et à moindre coût à partir de ces mesures. Elle comporte essentiellement une mesure de la perméabilité  $k$  des débris de roche, une mesure de la courbe de pression capillaire  $P_c$  en fonction de la saturation de ces fragments initialement saturés d'un fluide (de la saumure par exemple) en les soumettant à une centrifugation, et le paramétrage d'une courbe de pression capillaire  $P_c$  satisfaisant à des relations empiriques dépendant de paramètres ajustables, que l'on contraint à s'ajuster à une partie asymptotique de la courbe capillaire mesurée par centrifugation, et à la valeur de la perméabilité  $k$  mesurée sur les débris de forage, de façon à obtenir l'ensemble de la courbe de pression capillaire. Applications à l'évaluation d'un gisement en hydrocarbures par exemple.

5    **METHODE D'EVALUATION DE LA COURBE DE PRESSION CAPILLAIRE  
DES ROCHES D'UN GISEMENT SOUTERRAIN A PARTIR DE MESURES SUR  
DES DEBRIS DE ROCHE**

10    La présente invention a trait à une méthode d'évaluation d'une courbe de pression  
capillaire des roches d'un gisement souterrain à partir de mesures sur des débris de roche  
qui y sont prélevés

**Etat de la technique**

Mesures en laboratoire sur carottes ou débris de forage

15    La mesure de paramètres pétrophysiques tels que la perméabilité, la porosité et les  
propriétés capillaires sur des fragments de roche remontés au cours du forage d'un puits au  
travers d'une formation souterraine, constitue une opportunité intéressante pour les  
compagnies opératrices d'obtenir rapidement une première caractérisation pétrophysique  
de zones productrices traversées par le puits.

20    Par le brevet FR 2 809 821 du demandeur, on connaît un système pour évaluer des  
paramètres physiques tels que leur perméabilité absolue de roches poreuses d'une zone  
d'un gisement souterrain, à partir de débris rocheux remontés dans la boue d'un forage.  
Dans une enceinte où les débris sont plongés dans un fluide visqueux, on injecte de ce  
même fluide sous une pression croissante avec le temps, jusqu'à un seuil de pression  
définie, de manière à comprimer le gaz piégé dans les pores de la roche. Cette phase  
25    d'injection est suivie d'une phase de relaxation avec arrêt de l'injection. L'évolution de la  
pression durant le processus d'injection ayant été modélisée à partir de valeurs initiales  
choisies pour les paramètres physiques des débris, un calculateur les ajuste itérativement

pour faire coïncider au mieux la courbe de pression modélisée avec la courbe de pression réellement mesurée

Par la demande de brevet FR 02/0023 du demandeur, on connaît une autre méthode pour évaluer des paramètres physiques tels que la perméabilité absolue et la porosité des roches d'une zone d'un gisement souterrain, à partir également de débris de forage. Une enceinte contenant les fragments de roche et remplie d'un fluide visqueux est mise en communication avec un réservoir de ce même fluide sous une pression définie de manière à comprimer le gaz piégé dans les pores de la roche. La durée d'application de cette pression selon qu'elle est courte ou plus longue permet de mesurer soit la variation de la pression dans l'enceinte ou la variation du volume effectivement absorbé par les fragments de roche. Ensuite, on modélise l'évolution de la pression ou du volume dans l'enceinte, à partir de valeurs initiales choisies pour les paramètres physiques des fragments, et on ajuste itérativement les valeurs des paramètres physiques des fragments de roche pour que l'évolution modélisée s'ajuste au mieux avec l'évolution mesurée du paramètre physique dans l'enceinte.

Dans le domaine de la caractérisation pétrophysique, la pression capillaire est aussi une donnée très importante pour les opérateurs car elle conditionne :

- la distribution initiale des fluides dans le réservoir depuis la zone aquifère (dite WOC pour "Water Oil Contact" par les gens de l'art) jusque dans la partie supérieure du réservoir (zone de transition). Suivant la courbe de pression capillaire associée à une roche réservoir et la nature des fluides en place, cette zone de transition peut s'étendre sur quelques mètres ou quelques dizaines de mètres ce qui a un impact important sur la détermination des accumulations en place.
- la pression d'entrée d'une roche ce qui est particulièrement important pour les roches couvertures. Par exemple, pour un réservoir de stockage de gaz, la pression d'entrée des roches de couverture conditionne directement la surpression admissible dans les niveaux de stockage sans avoir de fuites.

Avec les techniques actuelles, la courbe de pression capillaire est obtenue par l'intermédiaire de mesures en laboratoire sur des carottes de gisement. Ces méthodes sont chères aussi bien à cause des opérations de carottage que des opérations de mesure sur les carottes et les résultats ne sont souvent disponibles que plusieurs mois après le forage.

*Approches pour obtenir rapidement la courbe de pression capillaire*

Il existe cependant des méthodes alternatives décrites dans la littérature pour évaluer le courbe de pression capillaire rapidement, soit en cours du forage soit en léger différé.

5 L'approche la plus couramment utilisée consiste à utiliser la technique de la porosimétrie au mercure pour mesurer la courbe de pression capillaire  $P_c$  air/mercure directement à partir de déblais de forage ou "cuttings". Néanmoins, la courbe obtenue diffère largement par rapport à la courbe de référence obtenue sur carotte aux fortes saturations en fluide mouillant. D'autre part, cette approche repose sur l'utilisation de  
10 mercure qui est extrêmement polluant et progressivement interdit par la législation dans de nombreux pays, ce qui pose un problème majeur pour l'application de cette technique dans un futur proche.

Une autre méthode connue utilise la Résonance Magnétique Nucléaire (RMN ) pour estimer rapidement la courbe de pression capillaire à partir des données diagraphiques  
15 mesurées dans le puits peu après le forage. Elle est mise en œuvre notamment dans les publications suivantes :

- Bowers, M., A. et al. : " Prediction of permeability from capillary pressure curves derived with NMR", 17 September, 1998 ;
- Marshall, D., et al. : "Method for correlating NMR relaxometry and mercury injection  
20 data" , SCA n° Society of Core Analysts International Symposium 1995 ;
- Volokitin, Y., W. J. et al. : "A practical approach to obtain 1st drainage capillary pressure curves from NMR core and Log data" , SCA n° Society of Core Analysts International Symposium 1999.

Le signal de relaxation RMN est d'abord converti en termes de distribution de taille  
25 de pore puis ensuite en terme de distribution de taille de seuils ce qui permet de calculer une pseudo courbe de pression capillaire. Cette approche a été testée sur plusieurs échantillons de courbe de  $P_c$  connue. Les résultats montrent que l'obtention d'un bon accord avec les courbes de référence passe par une phase de calibration rigoureuse à réaliser au cas par cas suivant la nature des roches étudiées. Cette phase de calibration est  
30 nécessaire du fait de l'incertitude au niveau :

- de la conversion signal RMN – distribution de taille de pore qui dépend de la valeur de la relaxivité de surface variable suivant les roches ; et
- de la conversion distribution de tailles de pore – distribution de tailles de seuil qui dépend de la nature de la roche et du processus de diagenèse.

5 Cette approche n'est donc pas recommandée dans un contexte prédictif d'exploration. Elle ne serait de toute façon pas applicable sur débris de forage.

L'analyse d'image a aussi fait l'objet de travaux visant à l'obtention d'une courbe de Pc. Le milieu poreux est préalablement préparé sous forme d'une lame mince photographiée par microscopie électronique à balayage dite SEM pour "Scanning Electron  
10 Microscopy". L'image obtenue est alors analysée de manière à déterminer des paramètres représentatifs de la proportion et de la forme des vides par rapport à la roche. En particulier, il est possible de déterminer une distribution de taille de seuil pour reconstruire une pseudo courbe de pression capillaire Pc. La principale limitation de cette méthode est la nature bidimensionnelle (2D) de la lame mince tandis que la pression capillaire est par  
15 définition une propriété tridimensionnelle (3D). D'autre part, cette technique requiert un conditionnement assez lourd peu compatible avec l'obtention d'un résultat en léger différé. L'analyse d'image serait éventuellement applicable sur débris de roche mais nécessiterait une calibration soignée pour acquérir une bonne prédictibilité.

A noter pour terminer que la technique de centrifugation est parfois appliquée sur  
20 chantier à des débris de forage mais c'est dans le but d'extraire le plus possible de fluide de forage de la roche pour minimiser les rejets polluants dans l'environnement mais aussi pour limiter les coûts en recyclant le fluide de forage récupéré. A notre connaissance, aucune mesure de centrifugation sur débris de forage n'a été envisagée dans le but de déterminer des propriétés capillaires.

## 25 **La méthode selon l'invention**

La méthode selon l'invention permet de déterminer la courbe de pression capillaire de roches d'un gisement souterrain à partir de mesures sur des débris ou fragments de roche qui y sont prélevés (tels que des débris de forage), sur tout l'intervalle de saturation de ces roches, ceci dans un délai réduit et à moindre coût à partir de ces mesures. Elle  
30 comporte :

- une mesure de la perméabilité  $k$  des débris de roche ;
- une mesure de la courbe de pression capillaire  $P_c$  en fonction de la saturation des débris de roche initialement saturés d'un fluide en les soumettant à une centrifugation ;  
et

- 5 - le paramétrage d'une courbe de pression capillaire  $P_c$  satisfaisant à des relations empiriques dépendant de paramètres ajustables, que l'on contraint à s'ajuster à une partie asymptotique de la courbe capillaire mesurée par centrifugation, et à la valeur de la perméabilité  $k$  mesurée sur les débris de forage, de façon à obtenir l'ensemble de la courbe de pression capillaire.

10 Le paramétrage de la courbe est effectué avantageusement en sélectionnant par défaut un jeu des dits paramètres permettant un calage sur la partie asymptotique de la pression capillaire  $P_c$  aux faibles saturations, et par une modification de proche en proche des paramètres de manière que l'estimation de la perméabilité donnée par une des relations empiriques utilisées, s'ajuste au mieux avec les mesures de perméabilité  $k$  réalisées sur  
15 débris de roche et avec cette partie asymptotique.

La mesure la perméabilité  $k$  des débris de roche est effectuée par exemple à partir de mesures des variations de pression à l'intérieur d'un récipient rempli d'un fluide contenant les débris de roche après sa mise en communication durant un temps défini avec un réservoir de ce même fluide sous pression, et à partir du volume effectivement absorbé  
20 par les débris de forage, et d'une modélisation de l'évolution de la pression ou du volume dans le récipient, à partir de valeurs initiales choisies pour les paramètres physiques des débris de roche, que l'on ajuste itérativement pour que l'évolution modélisée de la pression s'ajuste au mieux avec l'évolution mesurée des paramètres physiques des débris de roche.

La méthode est avantageuse notamment en ce qu'elle fournit la pression capillaire  
25 des roches sur la base de simples débris de forage plus facilement disponibles et moins coûteux à obtenir. Les résultats sont également obtenus bien plus rapidement qu'avec des carottes.

## 1. Présentation sommaire des figures

Les caractéristiques et avantages de la méthode selon l'invention, apparaîtront plus clairement à la lecture de la description ci-après d'un exemple non limitatif de mise en oeuvre, en se référant aux dessins annexés où :

- 5 - la fig.1 montre l'évolution du signal RMN au cours de différents paliers de centrifugation réalisés sur des débris de forage ;
- la fig.2a montre les courbes de Pc obtenues sur une même roche (B7) à partir de débris (cuttings) et d'une carotte ;
- la fig. 2b montre la comparaison entre la courbe de Pc de référence mesurée sur carotte  
10 avec la courbe de Pc reconstruite sur tout l'intervalle de saturation à partir des mesures de centrifugation et de la mesure de la perméabilité ;
- les fig.3a et 3b montrent des résultats comparables à ceux montrés aux Fig.2a et Fig.2b respectivement pour une autre roche GDV1 ;
- les fig.4a et 4b montrent des résultats comparables à ceux montrés aux Fig.2a et Fig.2b  
15 respectivement pour une autre roche Rot1 ;
- les fig.5a et 5b montrent des résultats comparables à ceux montrés aux Fig.2a et Fig.2b respectivement pour une autre roche St Max ;
- la fig.6 montre la comparaison entre les perméabilités de référence et les perméabilités mesurées sur débris de forage dans le cadre de la méthode décrite dans déposée dans la  
20 demande de brevet FR 02/0023 précitée ; et
- la fig.7 montre schématiquement l'organigramme de mise en oeuvre de la méthode.

### Description détaillée de la méthode

La méthode d'évaluation rapide d'une courbe de pression capillaire Pc à partir de déblais ou fragments de roche selon l'invention est illustrée par la fig.7. La méthode repose  
25 sur deux phases de mesure expérimentales suivies d'une phase de paramétrisation par référence avec des courbes connues, pour reconstruire la courbe de Pc sur tout l'intervalle de saturation. Durant l'une des phases de mesure, on acquiert des données de pression

capillaire  $P_c$  en centrifugeant les fragments de roche préalablement saturés en eau. L'autre phase expérimentale permet de calculer la valeur de perméabilité  $k$  de la roche à partir de la méthode décrite dans la demande de brevet FR 02/0023 déjà citée. La reconstruction de la courbe  $P_c$  sur tout l'intervalle de saturation est effectuée en utilisant une forme paramétrée. Les paramètres de la courbe sont déterminés de façon que la courbe s'accorde aux données de pression capillaire  $P_c$  obtenues expérimentalement et avec la valeur estimée de perméabilité à partir de la courbe de  $P_c$  obtenue selon une méthode connue telle que celle de Thomeer ou celle de Swanson Kamath qui seront rappelées plus loin, avec la valeur mesurée sur les fragments de roche. Plusieurs cas d'application sont proposés qui montrent le très bon accord obtenu avec des courbes de référence sans procédure particulière de calibration préalable.

### **I) Mesure de $P_c$ par centrifugation à partir des fragments de roche**

Pour la mise en œuvre de la méthode, il peut utiliser des moyens standards de centrifugation ou des moyens plus sophistiqués avec un suivi automatique des volumes de fluide produits comme ceux décrits par exemple dans les brevets EP 603040 (US 5,463,894), FR 2 763 690, FR 2 772 477 (US 6,185,985) ou FR 2 798 734 du demandeur.

Les fragments de roche remontés au cours du forage sont préalablement nettoyés avec des solvants dans un appareil de type Soxhlet, puis séchés et saturés en saumure 30 g/l. Les fragments de roche sont ensuite égouttés dans un tissu humide de manière à éliminer l'eau piégée entre les différents fragments de roche et puis introduits dans une cellule ou godet fixé à l'extrémité d'un bras tournant. L'eau expulsée par centrifugation hors des débris de roche traverse une grille et est recueillie à la base du godet. L'acquisition des données expérimentales se fait de la même manière que dans le cadre de la centrifugation sur une carotte. Pour un palier de centrifugation (vitesse de rotation donnée), on mesure l'évolution de la production en eau jusqu'à ce que l'on n'observe plus de variations significatives, puis on augmente la vitesse de rotation pour commencer un nouveau palier.

Comme le montre la fig.1 on observe une diminution progressive du signal RMN et un décalage vers les faibles temps de relaxation  $T_2$  qui traduisent une désaturation du milieu poreux avec l'augmentation de la vitesse de rotation. Ce type de mesure prouve que

l'on a bien un contact capillaire entre les débris de roche ce qui permet de mesurer la  $P_c$  par centrifugation à partir de débris de forage.

Le volume d'eau produit au cours de l'expérience est converti en données de saturation à partir du volume d'eau initialement contenu dans les fragments de roche. Ce dernier est déterminé par pesée (différence de poids des fragments de roche avant et après la saturation) ou directement par mesure RMN.

Les figures 2a à 5a montrent le résultat d'expériences réalisées à partir de fragments de roche modèles, de taille 1 à 2 mm, fabriqués au laboratoire à partir de roches de propriétés connues pour lesquelles on dispose d'une courbe de  $P_c$  mesurée de manière classique par centrifugation d'une carotte. On peut vérifier que l'on obtient une bonne correspondance avec la courbe de référence au niveau de la partie asymptotique (faible saturation en fluide mouillant). En revanche, on observe une différence importante pour les saturations en fluide mouillant plus élevées. On obtient donc des résultats équivalents à ceux obtenus dans le cadre de mesures de porosimétrie utilisant le mercure sur fragments de roche et cela sans risque de pollution.

La courbe de pression capillaire  $P_c$  mesurée n'est cependant représentative que sur la partie asymptotique. Une procédure de reconstruction est donc nécessaire pour évaluer le comportement de la courbe sur tout l'intervalle de saturation.

## **II) Mesure de la perméabilité $K$ des fragments de roche**

Pour mesurer la perméabilité des fragments de roche, on applique la méthode décrite dans la demande de brevet précitée 02/02242. A cet effet, on plonge les fragments de roche dans une enceinte de confinement contenant un fluide visqueux. On met alors l'enceinte en communication avec un récipient contenant ce même fluide sous pression, de manière à comprimer le gaz piégé dans les pores de la roche. Suivant un premier mode de mise en œuvre, cette mise en communication peut être très brève et suivie après un temps d'attente, d'une mesure de l'évolution de la pression dans l'enceinte. Suivant un autre mode de mise en œuvre, la mise en communication est assez longue pour que l'on puisse observer et mesurer la variation du volume effectivement absorbé par les fragments de roche.

Ensuite, on modélise l'évolution de la pression ou du volume dans l'enceinte, à partir de valeurs initiales choisies pour les paramètres physiques des fragments de roche, et on ajuste itérativement les valeurs des paramètres physiques des fragments de roche de roche pour que l'évolution modélisée s'ajuste au mieux avec l'évolution mesurée du paramètre physique dans l'enceinte.

Cette procédure donne d'excellents résultats. Les valeurs de perméabilité  $k$  des fragments de roche sont tout à fait conformes aux mesures de référence obtenues à partir de carottes.

### III) Reconstruction de la courbe totale de pression capillaire

Dans cette troisième étape on fait la synthèse des mesures précédentes ayant permis de construire la partie asymptotique de pression capillaire  $P_c$  et les mesures de la perméabilité  $k$ , en se servant de relations empiriques, réputées bien modéliser les paramètres physiques des roches. Par les publications suivantes :

- Thomeer, J. H. M. : "Introduction of a pore geometrical factor defined by the capillary pressure curve", Trans AIME, vol , March, pp 73-77, 1960 ; et
- Thomeer, J. H. M. : "Air permeability as a function of three pore network parameters", Trans AIME, vol , April, pp 809-814, 1983.

sont connues des procédures d'évaluation de la perméabilité à partir d'une courbe de pression capillaire. La courbe de pression capillaire  $P_c$  est modélisée sous la forme

$$P_c = P_d \times \exp\left(-\frac{G}{\ln\left(\frac{V_b(P_c)}{V_b(P_\infty)}\right)}\right) \text{ où :}$$

- $G$  est un paramètre de forme pour prendre en compte la courbure de la courbe de pression capillaire (reliée à la forme de la distribution de taille de pore) ;
- $P_d$ , la pression de déplacement extrapolée à  $S_{Hg}$  égale à zéro ; et
- $V_{b\infty}$ , le pourcentage de volume occupé par le mercure en fin d'expérience à pression capillaire infinie (égal à  $\phi \times S_{Hg}$ ),

les trois paramètres du modèle étant reliés à la perméabilité par l'expression suivante :

$$k = 3.8068 \times G^{-1.334} \times \left[ \frac{V_{b\infty}}{P_d} \right]^2$$

Dans la publication suivante :

- 5 - Swanson, B. F. : " A simple correlation between permeability and mercury capillary pressures", JPT, vol , December, pp 2498-2504, 1981,

10 Il est proposé également de corrélérer la valeur de la perméabilité avec la valeur maximale du rapport ( $V_b/P_c$ ) sur la courbe de porosimétrie mercure. Ce point particulier correspond généralement au changement de régime qui se produit à la fin du régime de percolation, juste avant l'augmentation significative de la pression capillaire. D'un point de vue capacité d'écoulement de fluide dans le milieu poreux, ce point est particulièrement important car il représente la taille de pore pour laquelle l'ensemble du réseau poreux est connecté et qui contrôle donc l'écoulement. La corrélation la plus générale fournie par l'auteur est donnée par l'expression (Swanson 1981).

$$k = 355 \times \left( \frac{V_b}{P_c} \right)_A^{2.005}$$

15 La publication suivante :

- Kamath, J. : "Evaluation of accuracy of estimating air permeability from mercury injection data", SPE Formation evaluation, vol 7, 4, pp 304-310, 1992,

20 porte également sur l'évaluation comparative des approches par corrélation empirique ou par modèle physique pour déterminer la valeur de la perméabilité à partir d'une courbe de porosimétrie mercure. Le meilleur accord est obtenu avec une nouvelle corrélation basée sur la longueur caractéristique de Swanson 1981 déjà cité :

$$k = 413 \times L_{\max}^{1.85} \quad \text{si } k < 1 \text{ mD}$$

$$k = 347 \times L_{\max}^{1.60} \quad \text{si } k > 1 \text{ mD}$$

$L_{\max}$  étant défini de la manière suivante :

$$L_{\max} = \left( \frac{\phi \times S_{nw}}{P_c} \right)_{\max} = \frac{\phi \times \lambda \times (100 - S_r)}{P_e \times (1 + \lambda)^{\frac{1}{\lambda} + 1}} \quad \text{et} \quad \left( \frac{P_e}{P_c} \right)^\lambda = \frac{S_w - S_r}{100 - S_r}$$

Avec :

- $\lambda$  : exposant traduisant la courbure de la courbe de pression capillaire (reliée à la forme de la distribution de taille de pore).
- $P_e$  : la pression de déplacement extrapolée à  $S_{Hg}$  égale à zéro.
- $S_r$  : saturation résiduelle occupée par le fluide mouillant (%).

Pour paramétrer la courbe de pression capillaire  $P_c$  empirique issue des approches de Thomeer, Swanson ou Kamath, on la contraint à s'ajuster à la partie asymptotique obtenue par centrifugation durant la première étape de la méthode. Pour contraindre l'ensemble de la courbe, on se sert en outre de la valeur de la perméabilité  $k$  mesurée sur débris de forage durant la deuxième étape de la méthode, que l'on compare avec ce que donnent les relations empiriques. On modifie alors les paramètres de la pression capillaire  $P_c$  jusqu'à ce que l'on honore à la fois le comportement asymptotique mesuré et l'estimation de la perméabilité ce qui permet de contraindre la courbe de pression capillaire sur tout l'intervalle de saturation  $S_w$ .

Le processus d'inversion démarre avec un jeu de paramètres par défaut qui permettent de caler le comportement asymptotique de la pression capillaire  $P_c$  aux faibles saturations en eau. On modifie alors de proche en proche ces paramètres (principalement la pression d'entrée, noté  $P_e$  ou  $P_d$ , et le facteur de forme, noté  $\lambda$  ou  $G$ ) de manière que l'estimation de la perméabilité donnée par une des relations précédentes soit en bon accord avec la mesure de perméabilité réalisée sur débris de forage tout en conservant un bon accord avec les mesures de  $P_c$  aux faibles saturations en eau.

### 1.1. Résultats obtenus

Les figures 2b, 3b et 4b et 5b montrent la comparaison entre la courbe de  $P_c$  reconstituée suivant la procédure précédente et la courbe de  $P_c$  de référence obtenue sur

une carotte. On constate que, quel que soit l'exemple considéré, la méthode de reconstruction permet d'obtenir une évolution pertinente de la Pc sur tout l'intervalle de saturation et en particulier aux fortes saturations en eau, quelle que soit la perméabilité de la roche.

5

Nom	K (md)	G	Vb (fraction)	Pe (bar)
Rot1	150	0.28	0.89	0.38
GDV1	195	0.28	1.00	0.41
B7	780	0.25	0.92	0.2
StMax	2000	0.34	0.92	0.26

## REVENDICATIONS

1) Méthode de détermination de la courbe de pression capillaire de roches d'un gisement souterrain à partir de mesures sur des débris de roche qui y sont prélevés, comprenant une mesure de la perméabilité  $K$  des débris de roche, caractérisée en ce qu'elle  
5 comporte :

- une mesure de la courbe de pression capillaire  $P_c$  en fonction de la saturation en soumettant à une centrifugation des débris de roche initialement saturés d'un fluide ; et
- le paramétrage d'une courbe de pression capillaire  $P_c$  satisfaisant à des relations empiriques dépendant de paramètres ajustables, que l'on contraint à s'ajuster à une  
10 partie asymptotique de la courbe capillaire mesurée par centrifugation, et à la valeur de la perméabilité  $k$  mesurée sur les débris de forage, de façon à obtenir l'ensemble de la courbe de pression capillaire.

2) Méthode selon la revendication 1, caractérisée en ce que le paramétrage comporte la sélection par défaut d'un jeu des dits paramètres permettant un calage sur la  
15 partie asymptotique de la pression capillaire  $P_c$  aux faibles saturations, et une modification de proche en proche des paramètres de manière que l'estimation de la perméabilité donnée par une des relations empiriques utilisées s'ajuste au mieux avec les mesures de perméabilité réalisées sur débris de roche et avec la dite partie asymptotique.

3) Méthode selon la revendication 1 ou 2, caractérisée en ce que l'on mesure la  
20 perméabilité  $k$  des débris de roche à partir de mesures des variations de pression à l'intérieur d'un récipient rempli d'un fluide contenant les débris de roche après sa mise en communication durant un temps défini avec un réservoir de ce même fluide sous pression et à partir du volume effectivement absorbé par les débris de forage, et d'une modélisation de l'évolution de la pression ou du volume dans le récipient, à partir de valeurs initiales  
25 choisies pour les paramètres physiques des débris de roche, que l'on ajuste itérativement pour que l'évolution modélisée de la pression s'ajuste au mieux avec l'évolution mesurée des paramètres physiques des débris de roche.

1/4

FIG.1

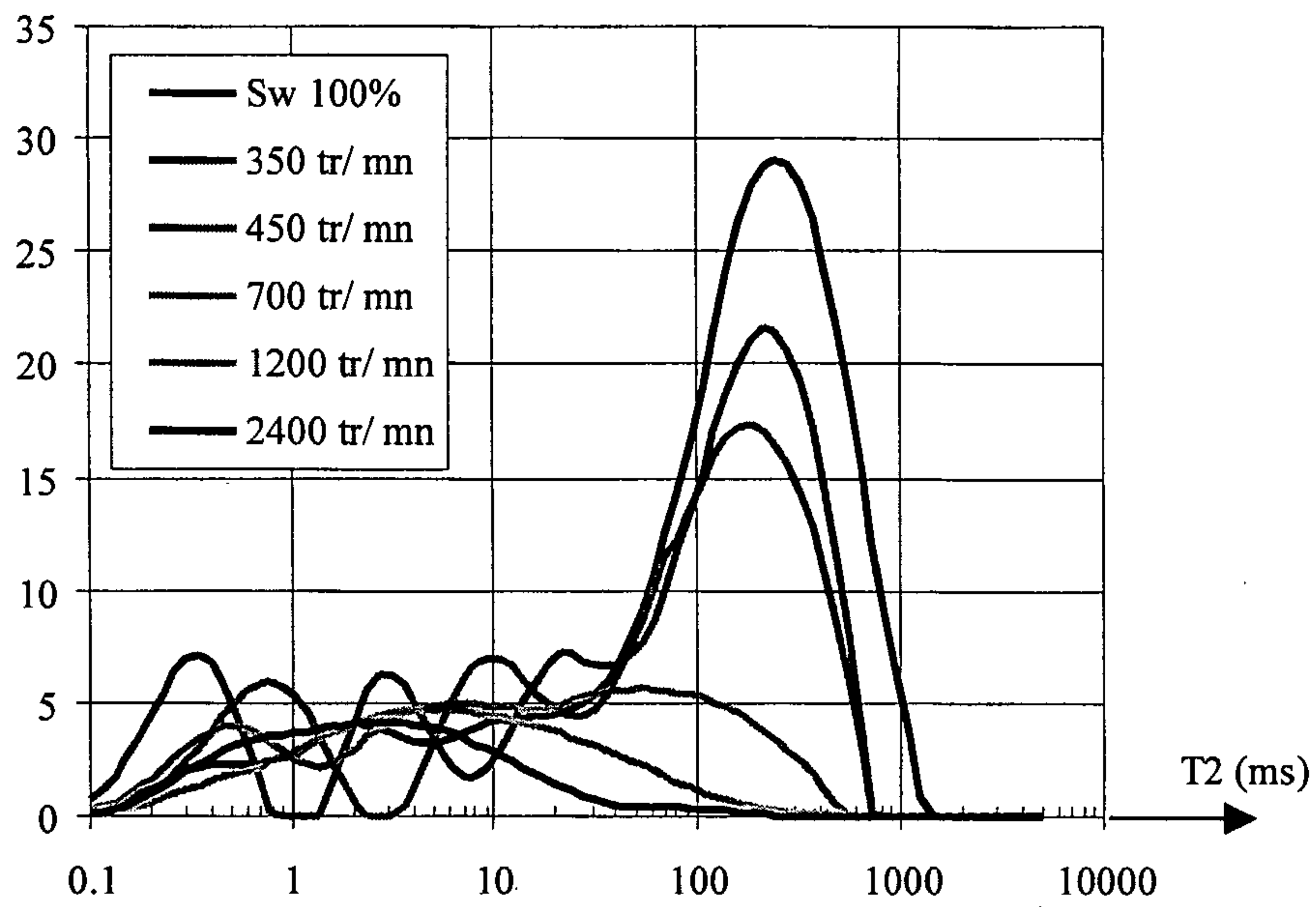


FIG.2A

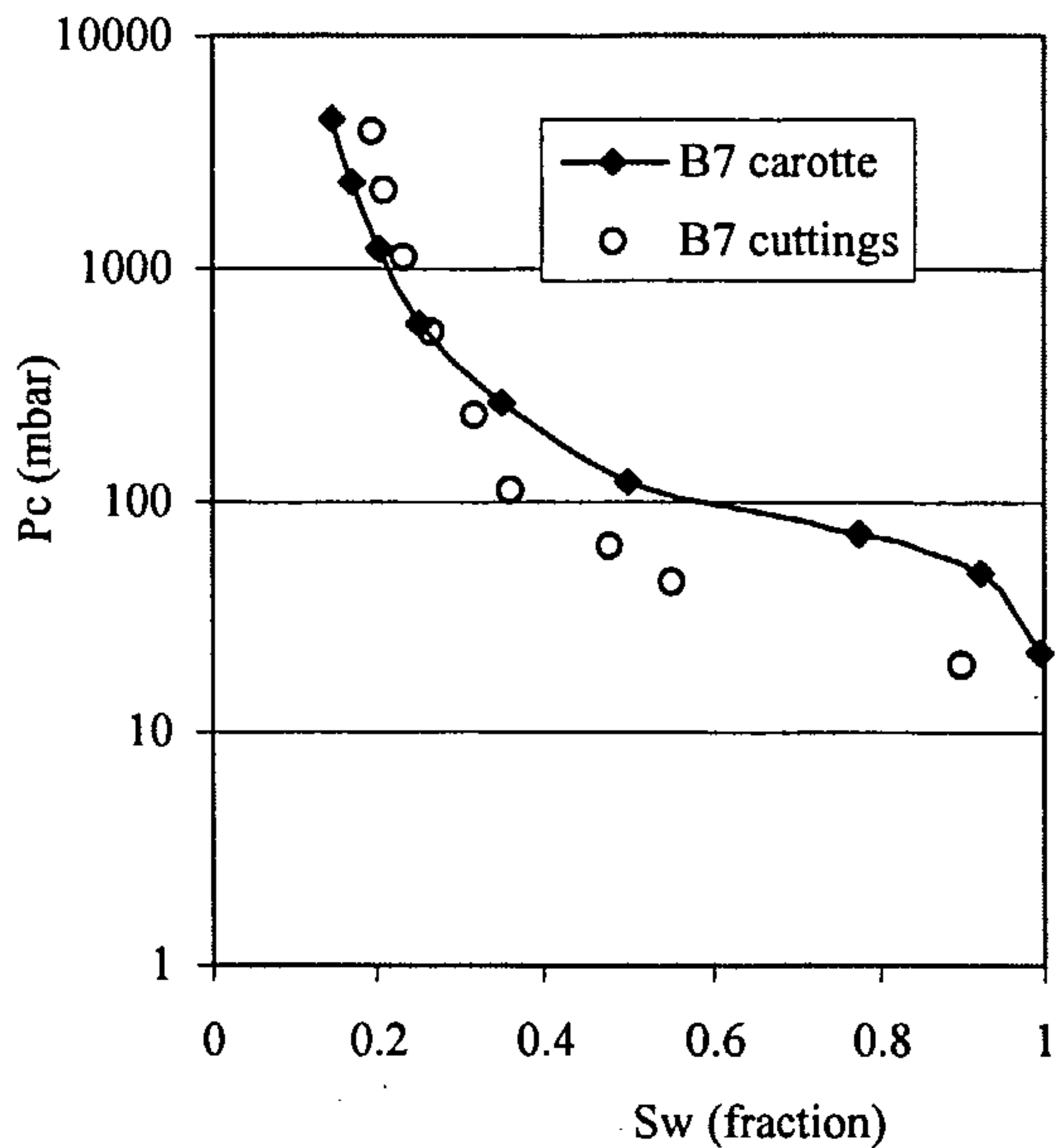


FIG.2B

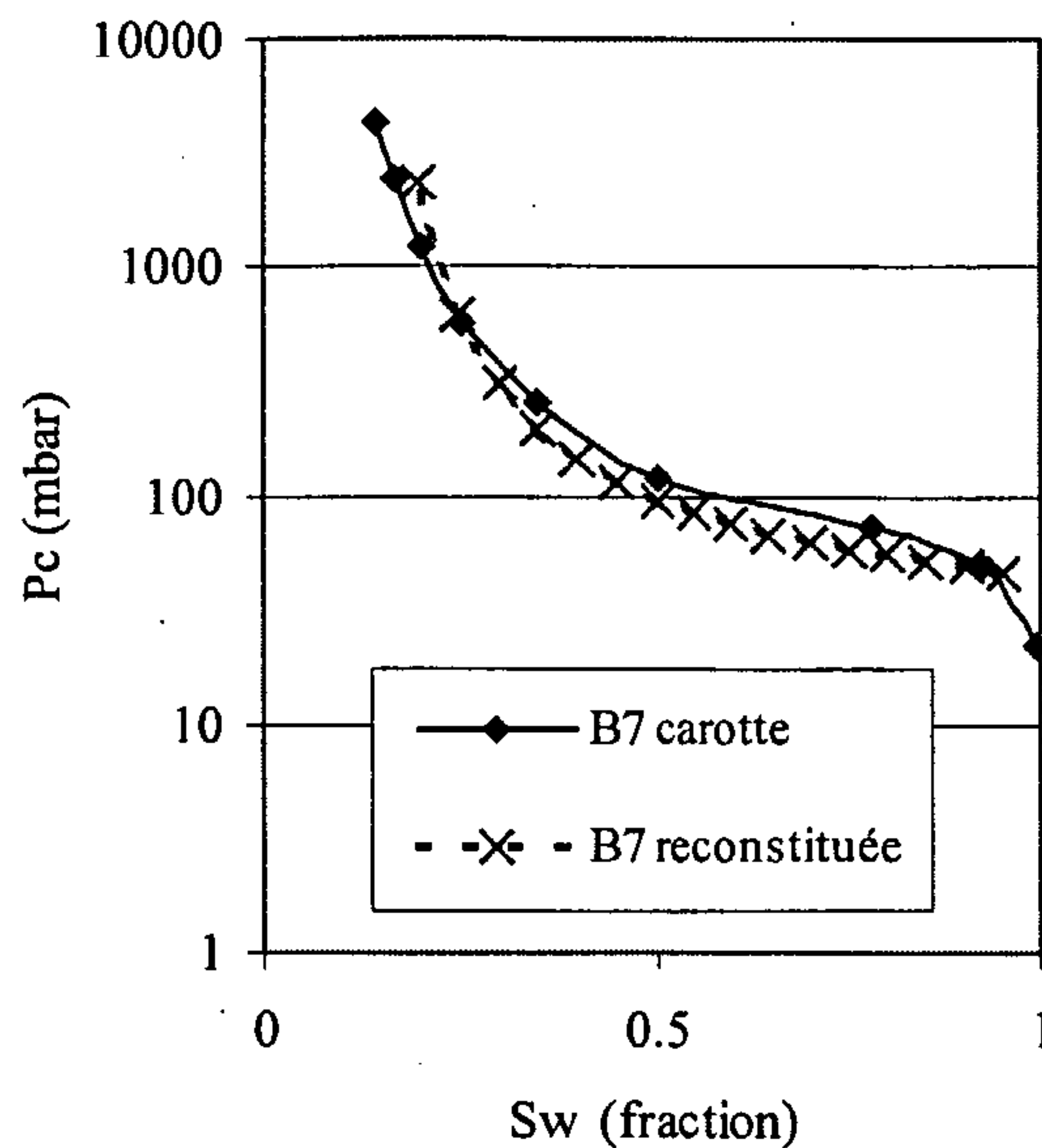


FIG.3A

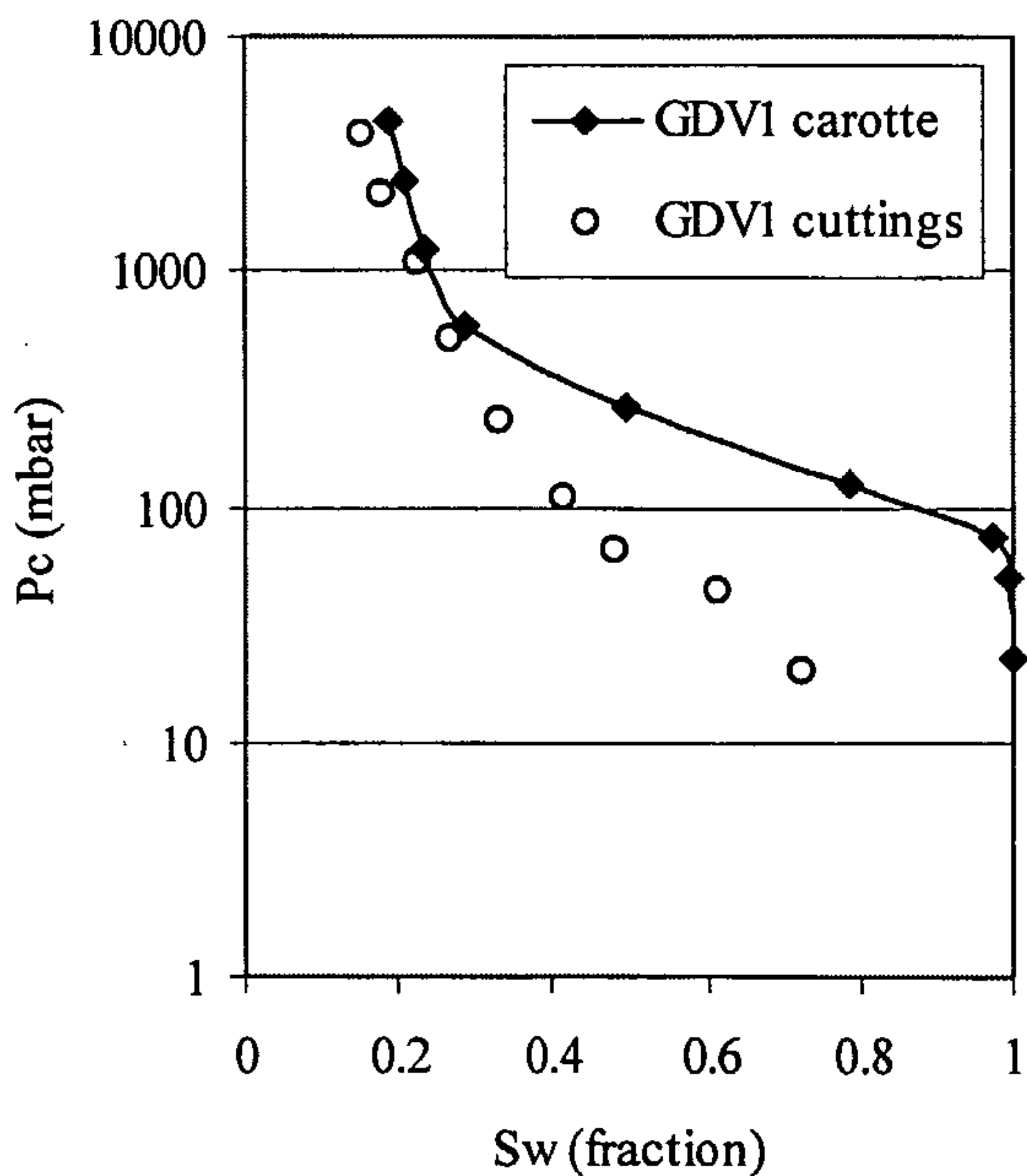
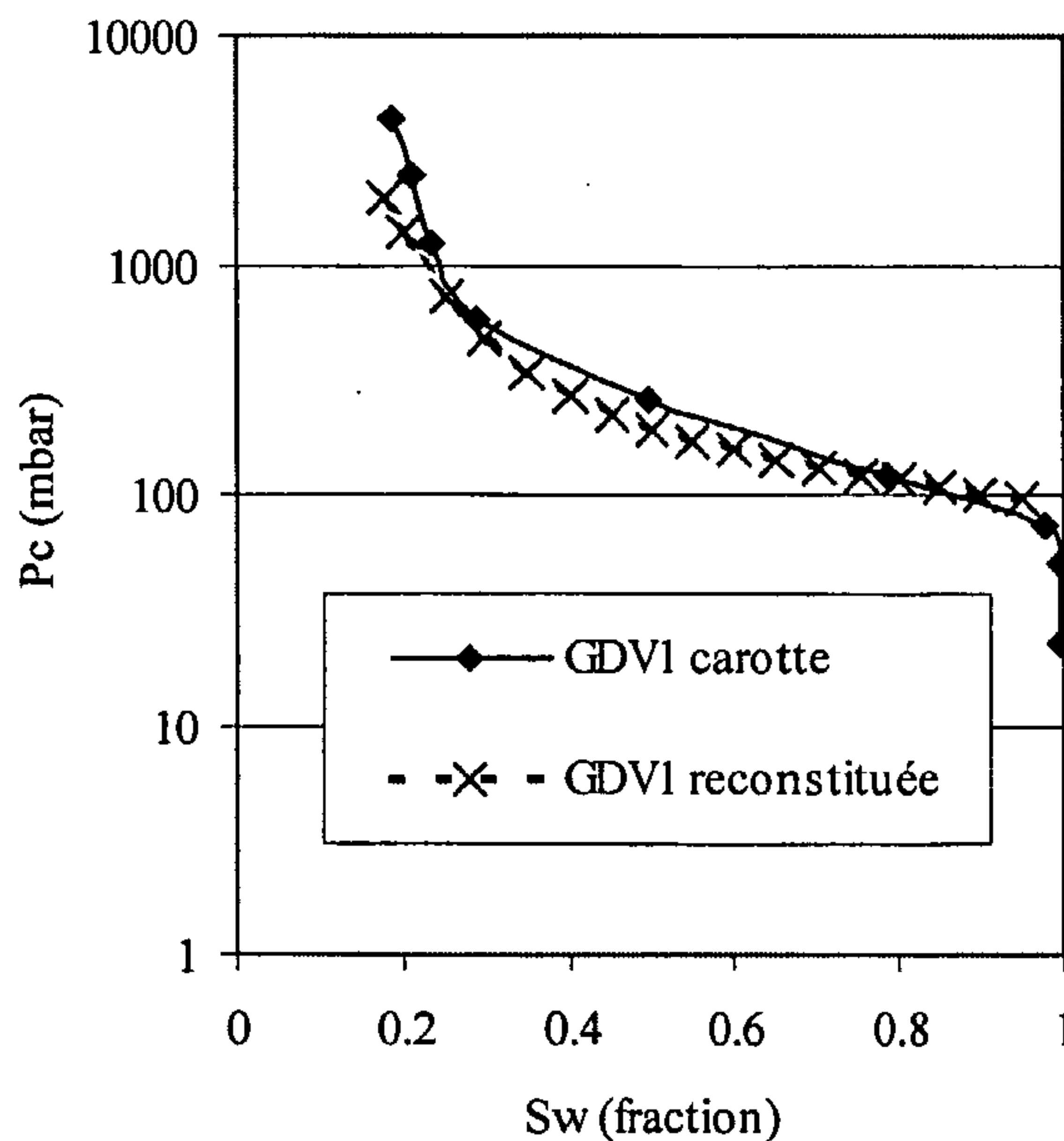
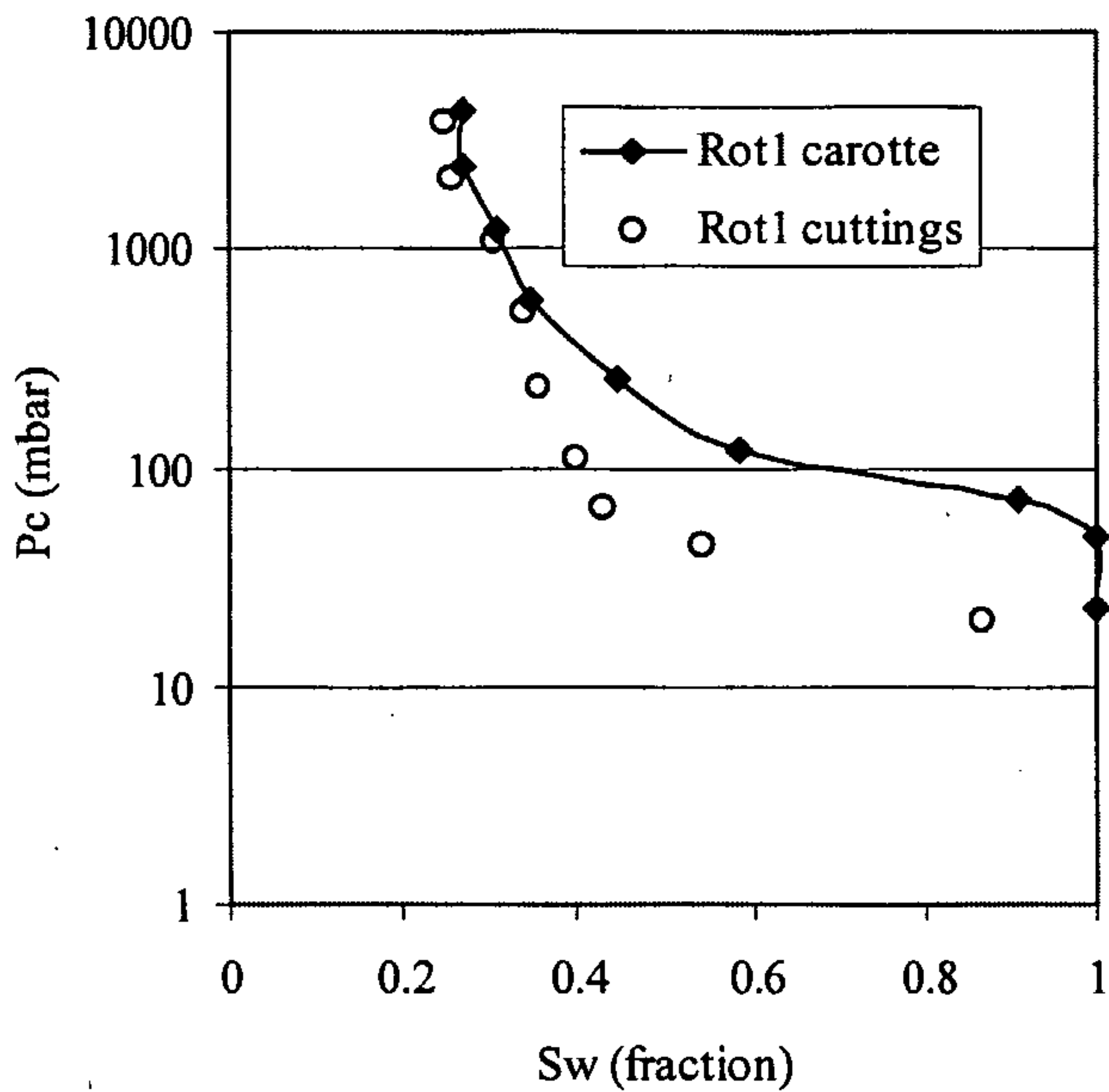


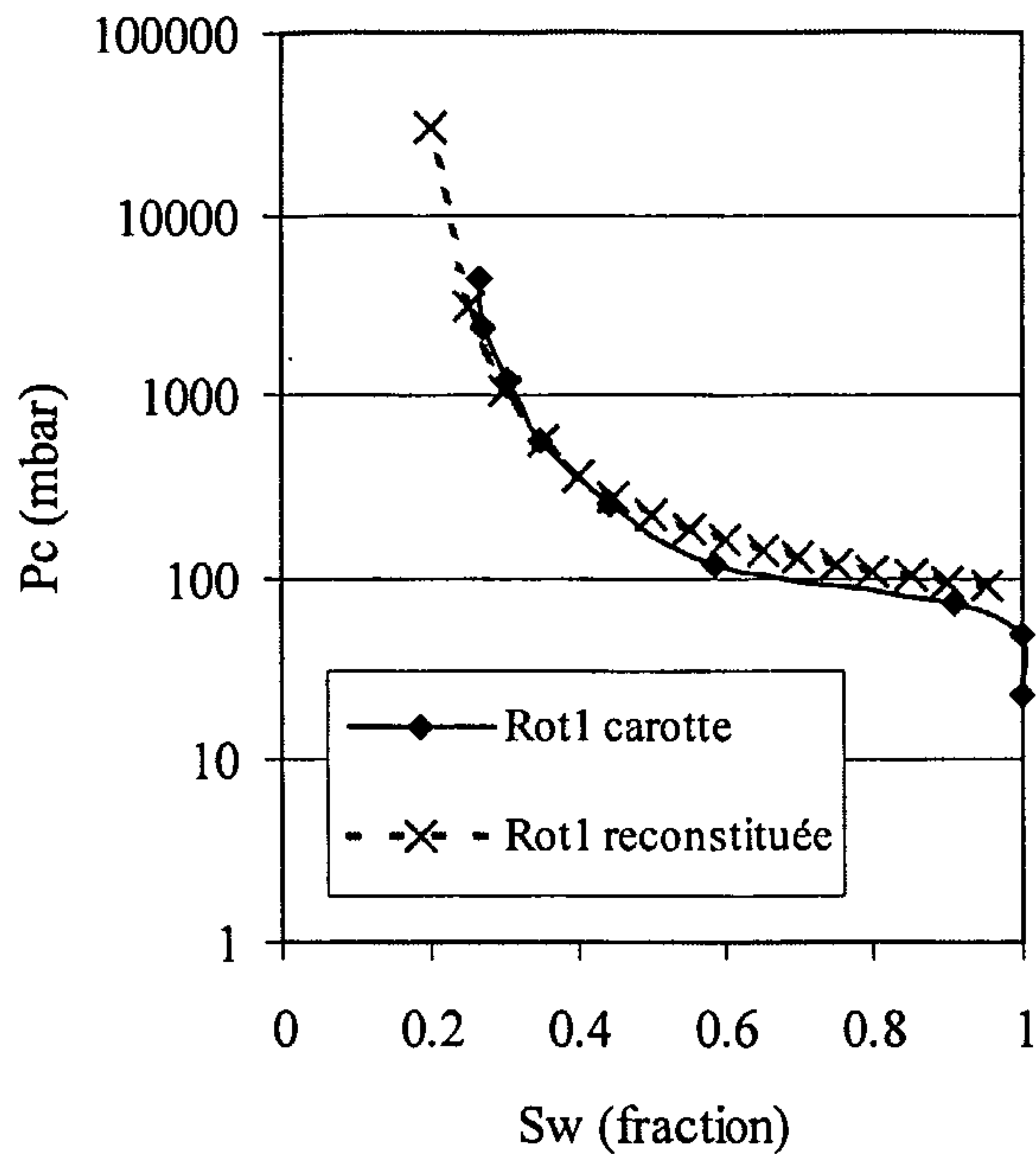
FIG.3B



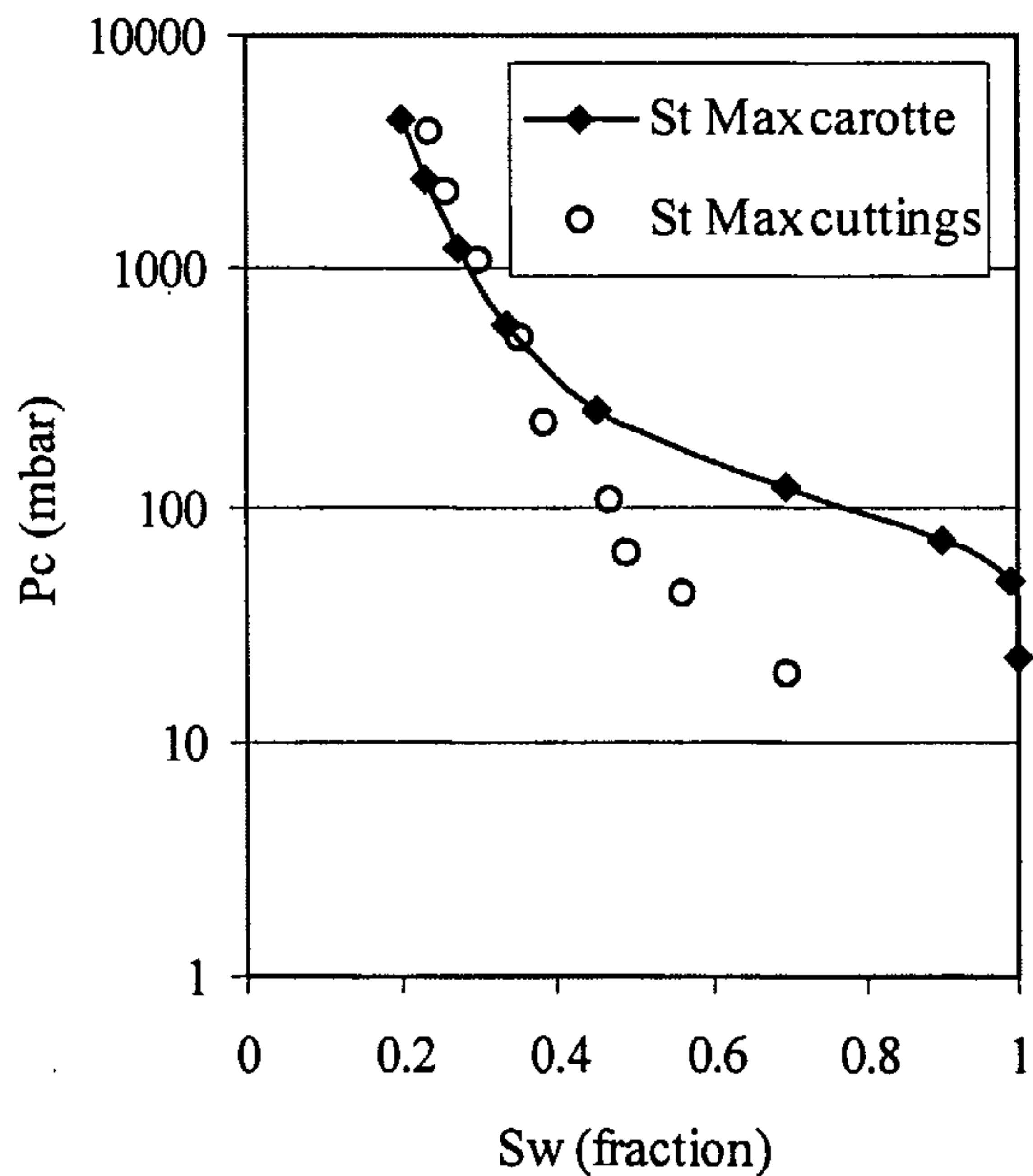
**FIG.4A**



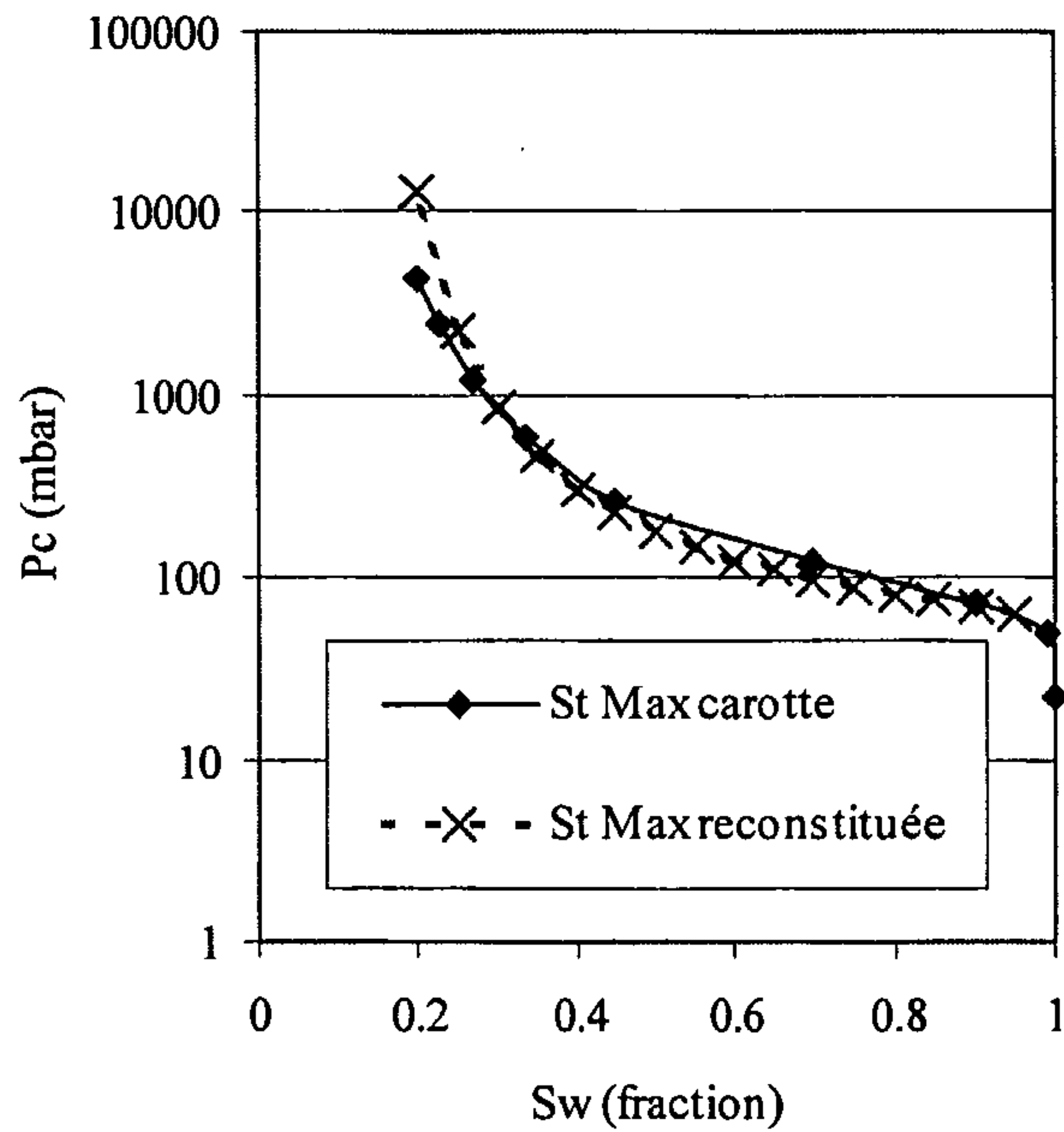
**FIG.4B**

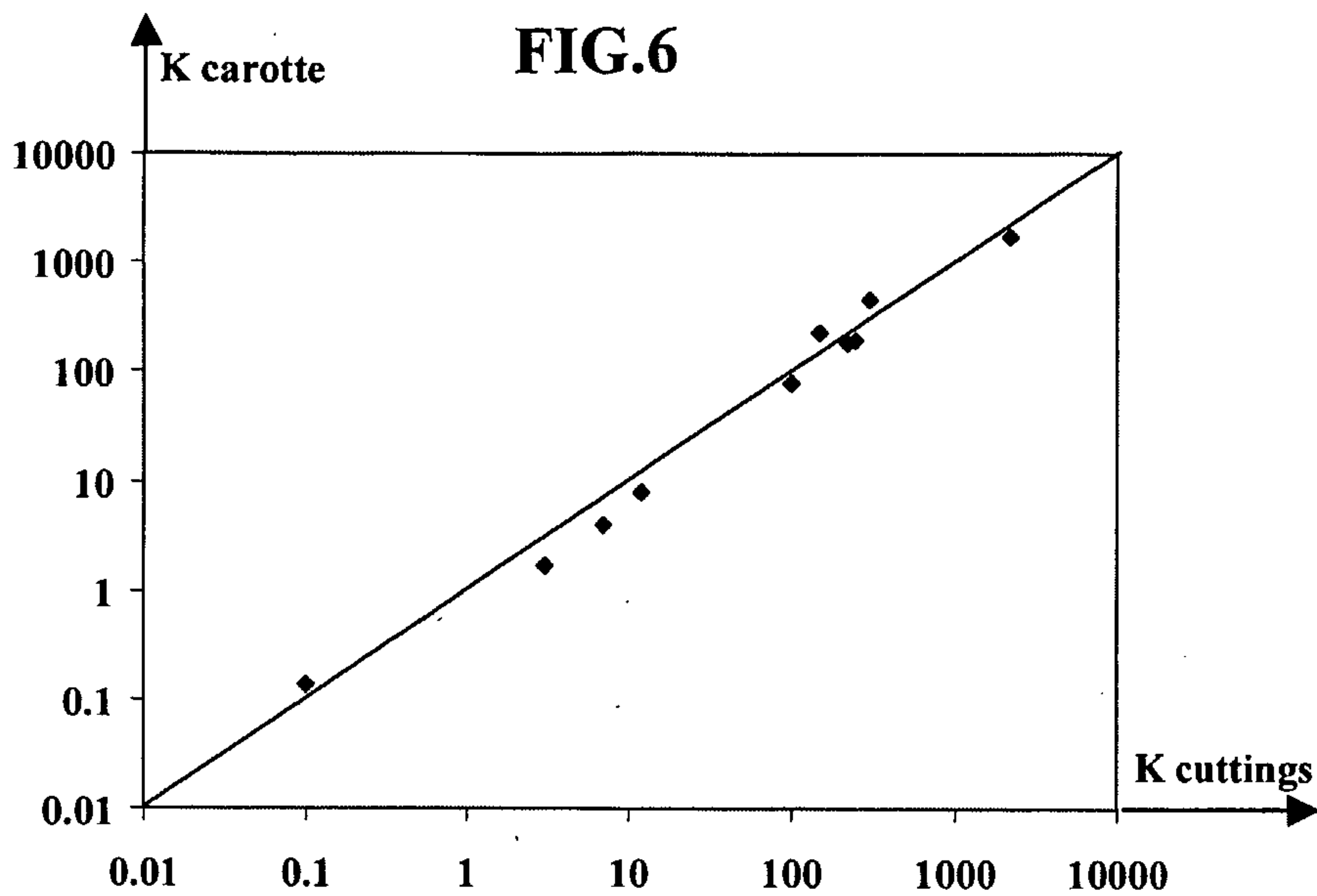


**FIG.5A**



**FIG.5B**





**FIG.7**

