

## INFLUENCE DE LA CARBONATATION SUR LA POROSITE DES BETONS

Reçu le 26/12/2007 – Accepté le 12/12/2008

### Résumé

Le but de ce travail est de comparer la porosité au mercure de bétons sains et de bétons soumis à la carbonatation durant 28 jours. Pour se faire, quatre types de bétons à base de deux ciments (CEM I et CEM II) ont été testés. Le rapport E/C varie de 0.35 à 0.67. Un superplastifiant de production locale (Medaflow 30) a été utilisé pour les deux bétons. L'influence de la carbonatation a été étudiée.

Les résultats obtenus montrent que la porosimétrie au mercure est une bonne méthode d'investigation de la carbonatation accélérée et que la carbonatation est bénéfique pour le béton seul du moment qu'elle réduit sa porosité..

**Mots clés :** Carbonatation, Porosité au mercure, Béton, Phénophtaléine.

### Abstract

The aim of this study is to compare the mercury porosity of a healthy concrete and a concrete subjected to carbonation during 28 days. To do this, four types of concrete made with two cements (CEM I and CEM II) were tested. The W/C ratio varies from 0.37 to 0.67. A nationwide superplasticizer (Medaflow 30) was used for both concretes.

The obtained results show that the mercury porosimetry is a good method of investigation for the accelerated carbonation and the carbonation is benefit for the concrete because it reduces his porosity.

**Keys words :** Carbonation, Concrete, Mercury Porosimetry.

<sup>1</sup> F-Z. DAKHMOUCHE,  
<sup>2</sup> X. BRUNETAUD,  
<sup>1</sup> H. CHABIL,  
<sup>2</sup> M. AL-MUKHTAR

<sup>1</sup> Laboratoire de Mécanique des Sols et des Structures, Université Mentouri Constantine - Algérie

<sup>2</sup> Centre de Recherche sur la Matière Divisée, CNRS-CRMD d'Orléans - Ecole Polytechnique, Université d'Orléans – 1b, rue de la Férollerie, 45071 Orléans Cedex 2 France

### ملخص

الهدف من هذا البحث هو المقارنة بين مسامية الزئبق للخرسانة السليمة و الخرسانة المتفحمة لمدة 28 يوما. لهذا الغرض 4 أنواع من الخرسانة المشكلة من نوعين من الإسمنت CEM I , CEM II خضعت لتجارب و نسبة E/C تتغير من 0.35 إلى 0.67 و هذا باستخدام ملدنات محلية تدعى Medaflow 30 لكلا الخرسانيتين.

تأثير التفحم، نوع الإسمنت و النسبة E/C درست.

النتائج المحصل عليها تبين أن المسامية للزئبق هي طريقة جيدة لدراسة التفحم المسرع .

**الكلمات المفتاحية :** التفحم، المسامية بزئبق، الخرسانة

La porosimétrie par intrusion de mercure constitue l'un des principaux outils d'investigation de la structure des pores supérieurs à 3 nm des pâtes de ciment, mortiers et bétons.

Cette technique permet de quantifier notamment la porosité « totale » ouverte d'un matériau, c'est-à-dire celle accessible depuis la surface du solide et les espaces existants entre les particules constitutives et la distribution des tailles des pores incluses dans le domaine de mesure de l'appareil.

La carbonatation d'un béton modifie la distribution des tailles des pores en réduisant la porosité de sa matrice cimentaire [1; 2; 3 et 4].

### 1. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le dispositif expérimental utilisé ici est celui du CRMD (Centre de Recherche sur la Matière Divisée). Il s'agit d'un porosimètre « Micromeritics Auto Pore IV » équipé de deux postes de mesure basse pression (entre 0 et 14 psi) et haute pression (entre 14 et 60000 psi) permettant d'accéder aux pores dont le diamètre est compris entre 3 nm et 860 µm (fig.1).

La température du laboratoire où est installé l'appareil est réglée à  $T = 20^{\circ}\text{C}$ , ce qui limite les risques de dilatation/contraction du mercure et garantit une bonne reproductibilité des essais.



**Figure 1 :** Appareil de mesure de la porosité au mercure du CRMD (postes à haute et basse pression).

### 2. MATERIAUX UTILISES

Nous avons utilisé des gravillons calcaires concassés de la carrière ENG d'El Khroub (0/3.15, 3.15/8, 8/16), un superplastifiant Medaflow 30 de Granitex, du ciment CEM I 42.5 de Msila et du ciment CEM II/A 42.5 de Ain Touta.

Les deux ciments se distinguent par une teneur en calcaire différente. Le CEM I contient 95% de clinker alors que le CEM II est composé de 80% de clinker et 15% de calcaire.

Grâce à la méthode des coulis de DE LARRARD [5], quatre types de bétons à base de rapports E/C différents (0.35, 0,63 et 0,67) et deux types de ciment (CEM I « C1 » et CEM II/A « C2 ») ont été conçus pour obtenir des niveaux de risque différents pour un même affaissement au cône d'Abrams et des résistances différentes.

Ces bétons ont été formulés selon la méthode de Dreux Gorisse. Des éprouvettes cylindriques (11\*22) cm ont été confectionnées puis mises dans l'eau pour une maturation de 28 jours. Par la suite, ces dernières ont été sciées sous eau à l'aide d'une scie diamantée pour donner de petits cylindres de (4\*11) cm qui ont subi un prétraitement de plusieurs mois dans une armoire climatique à température et humidité relative programmables afin d'atteindre ( $T^{\circ}=20^{\circ}\text{C}$ , HR=66%).

Les tableaux 1 et 2 donnent la composition ainsi que les caractéristiques rhéologiques et mécaniques de ces bétons.

**Tableau 1 :** Compositions des différentes formulations des bétons d'étude

Béton	C1E35	C2E35	C1E63	C2E67
E/C	0.35	0.35	0.63	0.67
E <sub>eff</sub> /C	0.18	0.18	0.40	0.45
E <sub>eff</sub> /(C+f)	0.13	0.13	0.28	0.32
Efficace	79,389	79,389	141,165	156,880
E <sub>totale</sub>	174,305	174,305	237,570	251,200
E <sub>ajoutée</sub>	169.540	168.457	235.900	249.560
Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	450	450	350	350
Sable 0/5	682.370	682.370	693.070	678.070
Granulat 3/8	140.056	140.056	142.300	139.200
Granulat 8/15	928.710	928.710	943.300	922.870
SP (%)	1	1.35	0	0
S/ (g <sub>1</sub> +g <sub>2</sub> )	0.638	0.638	0.638	0.638

**Tableau 2 :** Résistances à la compression des bétons d'étude

Béton	C1E35	C2E35	C1E63	C2E67
R <sub>c</sub> à 7j (MPa)	38.23	31.8	19.6	12.6
R <sub>c</sub> à 28j (MPa)	47.3	36.2	25.8	16.6
R <sub>c</sub> à 160j (MPa)	49	42	29.05	18.21
R <sub>c</sub> à 270j (MPa)	55	44.05	31.56	20.39

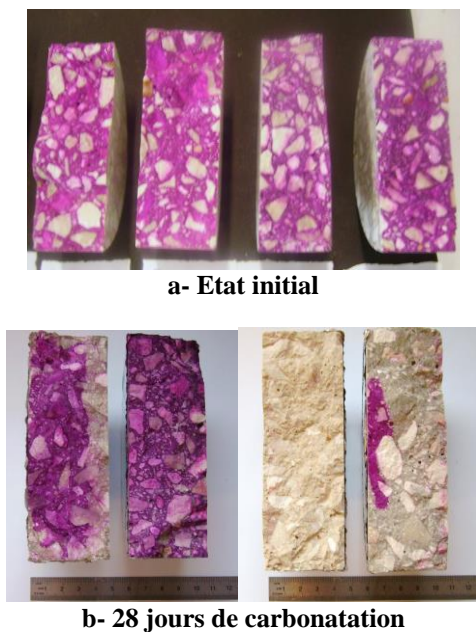
### 3. ESSAI DE CARBONATATION ACCELEREE

Une fois l'équilibre des échantillons atteint dans l'enceinte climatique, les éprouvettes ont été directement soumises à la carbonatation accélérée.

La carbonatation a été réalisée dans une enceinte de carbonatation que nous avons mise en place durant cette étude au niveau du laboratoire du CRMD d'une capacité de 95 litres [6]. L'alimentation en CO<sub>2</sub> est assurée à partir d'une bouteille de mélange 50% air et 50% CO<sub>2</sub> sous pression dont le débit est réglé à partir d'un manomètre. L'humidité relative de 66% est obtenue par une solution saline saturée en nitrite de sodium (NaNO<sub>2</sub>) [7]. La température est de 20 ± 2°C à l'intérieur de l'enceinte. Un ventilateur assure l'homogénéité de l'ensemble.

Pour évaluer la profondeur de carbonatation, nous avons utilisé principalement le test à la phénophtaléine. Il consiste à pulvériser une solution de phénophtaléine (1% dans l'éthanol) (fig.2) sur une fracture fraîche réalisée perpendiculairement à la surface soumise à la carbonatation par essai de fendage [8; 9].

Après quelques minutes, la profondeur de carbonatation est mesurée, pour chaque face, selon le mode opératoire AFPC-AFREM [8; 9]. L'épaisseur carbonatée se caractérise par le changement de couleur de l'indicateur qui vire au rose foncé dans la zone non carbonatée et incolore dans la zone carbonatée.

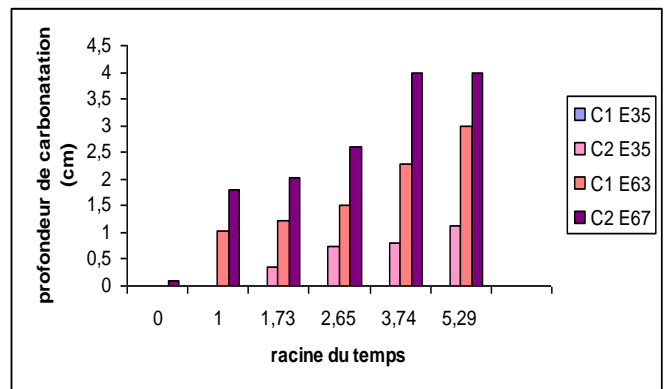


**Figure 2 :** Mise en évidence des fronts de carbonatation visualisés suite à la pulvérisation à la phénophtaléine des quatre types de bétons (C2E35, C1E35, C2E67, C1E63)

Le tableau 3 et la figure 3 montrent l'évolution de la profondeur de carbonatation des différents bétons au cours du temps jusqu'à 28 jours.

**Tableau 3 :** Profondeurs de carbonatation (pc) des différents bétons

Béton	C1E35	C2E35	C1E63	C2E67
Racine du tps (j)	pc (cm)	pc (cm)	pc (cm)	pc (cm)
0	0	0	0	0,1
1	0	0	1,03	1,79
1,73	0	0,37	1,23	2,02
2,65	0	0,73	1,52	2,60
3,74	0	0,812	2,283	4
5,29	0	1,11	2,98	4



**Figure 3 :** Evolution de la profondeur de carbonatation en fonction du temps

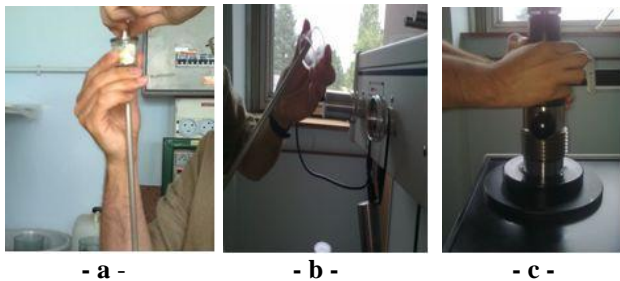
### 4. ESSAI DE POROSIMETRIE AU MERCURE

Des échantillons représentatifs de béton (morceaux d'environ 2 cm<sup>3</sup>) sont préparés en prenant soin d'exclure les gros morceaux de granulats. Ces échantillons sont prélevés sur des cylindres de béton 4x11 cm. Le prétraitement de ces échantillons se fait par un étuvage à 60°C, en présence de la chaux sodée et du gel de silice, afin d'éliminer toute l'eau liquide ou vapeur contenue dans les pores et ainsi assurer que l'ensemble du réseau poreux soit accessible au mercure. Le choix de la température d'étuvage est justifié par le souci de préserver la nature des hydrates et de n'évacuer que l'eau libre contenue dans les pores [10]. La présence du gel de silice garantit une humidité relative minimale dans l'étuve.

L'échantillon est placé dans un pénétromètre (fig.4a) qui est introduit dans la chambre basse pression (fig.4b) dans laquelle est réalisé un dégazage afin d'optimiser le volume poreux en évacuant l'eau contenue dans l'échantillon. Ensuite commence l'étape basse pression, le mercure envahit le pénétromètre. La montée en pression jusqu'à 0,1

MPa s'accompagne d'une baisse du niveau de mercure dans le capillaire pendant le retour à la pression atmosphérique. Ce phénomène, enregistré par le système capacitif de l'appareil, est une conséquence de la pénétration du mercure dans l'échantillon et permet l'investigation des pores dont le diamètre d'entrée est compris entre 860 nm et 128  $\mu\text{m}$ .

La dernière étape consiste à placer le pénétromètre dans un autoclave rempli d'huile diélectrique de la cellule haute pression (fig.4c) afin d'atteindre la pression maximale imposée (414 MPa). La montée en pression fait pénétrer le mercure dans les pores dont le diamètre d'entrée est compris entre 128  $\mu\text{m}$  et 6 nm [7].



**Figure 4 :** Mesure de la porosité au mercure  
 a- mise de l'échantillon dans le pénétromètre  
 b- mesure de la porosité à basse pression  
 c- mesure de la porosité à haute pression

Des essais de porosimétrie au mercure ont été ainsi réalisés sur des bétons sains et sur des bétons ayant subi une carbonatation accélérée durant 28 jours.

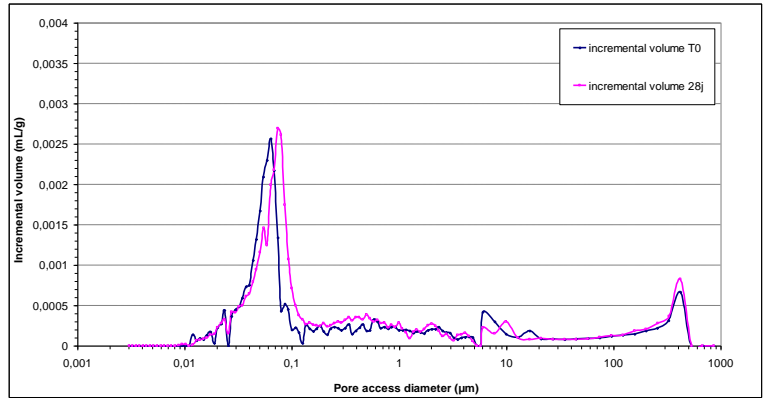
## 6. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

### 6.1. Effet de la carbonatation

Une comparaison entre les différents bétons, sains et carbonatés, est illustrée sur les figures 5, 6, 7 et 8.

Nous observons sur la Figure que les distributions des pores à l'état sain et à l'état carbonaté sont proches, les deux courbes correspondantes ont presque les mêmes allures avec un léger déplacement vers les plus gros pores pour le cas carbonaté.

Cette absence de différence est due à la très faible carbonatation du béton à base de CEM I et à E/C = 0,35.



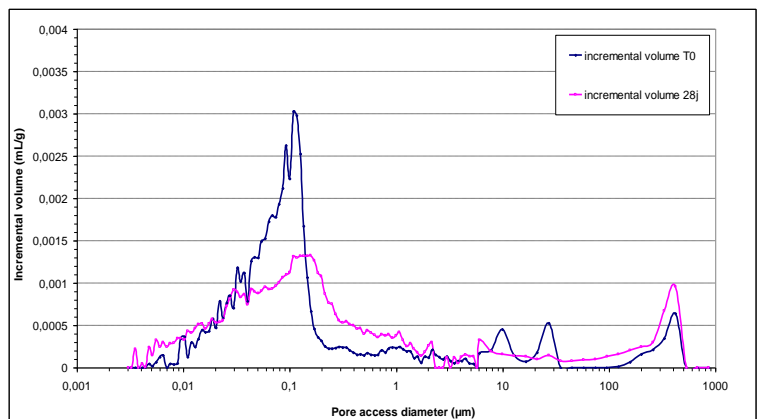
**Figure 5 :** Porosité au mercure du béton C1E35 à l'état initial ( $t_0$ ) et à l'état carbonaté (28 jours)

La Figure 7 : Porosité au mercure du béton C2E35 à l'état initial ( $t_0$ ) et à l'état carbonaté (28 jours).

6, qui présente les distributions porales d'un béton à base de ciment CEM I et à E/C = 0,63, met bien en évidence l'existence d'un mode principal inter-hydrates dans la zone des pores fins dont les diamètres varient entre 23 nm et 146 nm.

Ce mode principal est moins marqué dans l'état carbonaté et se déplace vers les plus gros pores. Ainsi, la carbonatation a généré une augmentation de la fraction des pores de taille comprise entre 150 nm et 2.2 $\mu\text{m}$ .

De la même manière, nous observons que les pores plus fins dont les diamètres varient entre 3 et



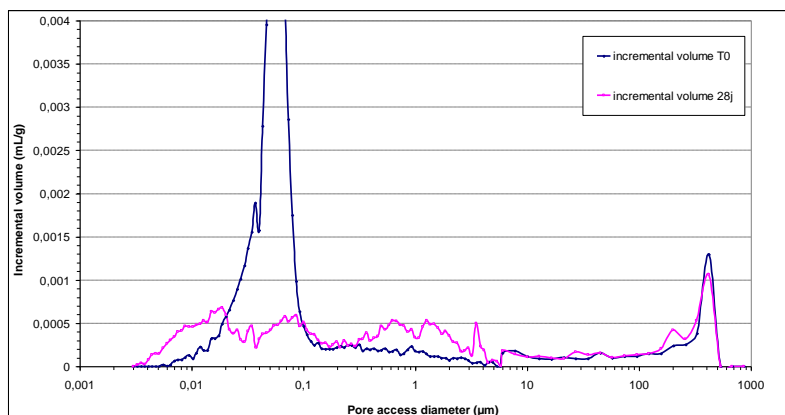
19 nm sont un peu plus nombreux à l'état carbonaté qu'à l'état sain.

**Figure 6 :** Porosité au mercure du béton C1E63 à l'état initial ( $t_0$ ) et à l'état carbonaté (28 jours)

Sur la Figure , qui présente la porosité au mercure d'un béton à E/C = 0.35 (C2E35), nous observons contrairement au béton (C1E35) qu'il n'y a pas de décalage mais une réduction très nette du mode correspondant aux diamètres compris entre 23 nm et 80 nm.

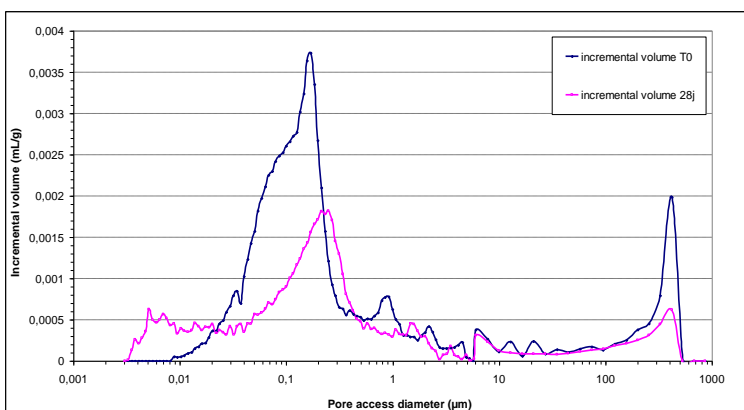


Les pores fins dont les diamètres varient entre 3 et 20 nm ainsi que les pores plus grossiers de diamètres compris entre 230 nm et 4,5  $\mu\text{m}$  sont plus nombreux à l'état carbonaté.



**Figure 7 :** Porosité au mercure du béton C2E35 à l'état initial ( $t_0$ ) et à l'état carbonaté (28 jours).

Pour le béton à  $E/C = 0.67$  (C2E67), le mode principal est plus étendu - diamètres compris entre 23 nm et 290 nm - et se déplace vers les plus gros pores pour l'état carbonaté (Figure ). Dans ce cas, la carbonatation génère une augmentation des pores dont les diamètres varient entre 3 nm et 22 nm et une diminution des pores dans l'intervalle de 425 nm à 4,9  $\mu\text{m}$ .



**Figure 8 :** Porosité au mercure du béton C2E67 à l'état initial ( $t_0$ ) et à l'état carbonaté (28 jours)

## CONCLUSIONS

La distribution en taille de pores des bétons sains est monomodale, le mode poral principal est situé entre 10 nm et 125 nm pour les faibles rapports  $E/C$  et il s'élargit pour les rapports  $E/C$  les plus élevés.

Ce mode peut être attribué à un espace poral lié à l'architecture des amas d'hydrates, correspondant au réseau poreux résiduel après formation des hydrates externes.

Les mesures de porosité des bétons carbonatés indiquent que la carbonatation affecte principalement les pores de petites dimensions. La réduction de cette porosité traduit l'occupation des interstices par les cristaux de carbonate de calcium formés durant la carbonatation. Elle est due au fait que les volumes de ces cristaux de calcite excèdent ceux des hydrates à partir desquels ils se forment et par conséquent, occasionne une diminution de la porosité. La porosité concernée correspond au mode poral principal, c'est-à-dire à la porosité inter-hydrates. Ce dernier se déplace vers les plus gros diamètres, ce qui signifie que la carbonatation ouvre cette porosité, certainement par dissolution de la portlandite initialement présente dans cette porosité. Par contre, les pores dont les diamètres varient entre 3 nm et 23 nm tendent à augmenter au cours de la carbonatation accélérée, ce qui signifie que dans la partie la plus fine du mode principal, la précipitation de la calcite génère une porosité beaucoup plus fine.

Il s'agit de porosité entre les amas de calcite néoformée, qui remplissent la porosité inter-hydrates, elle-même partiellement dégradée par dissolution de certains hydrates (portlandite). Ainsi, la carbonatation se traduit à la fois par une baisse de la porosité inter-hydrates, son décalage vers les plus gros pores et l'augmentation de la porosité la plus fine.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] R. Miragliotta, A. Aït-Mokhtar, P. Rougeau and P. Dumargue « Concrete carbonation, a predicting methodology of the front advance » In *Proceedings of the RILEM Workshop on life prediction and aging management of concrete life, Cannes, France, (on CD-ROM), 16-17 October 2000.*
- [2] W. Jaafar. « Influence de la carbonatation sur la porosité et la perméabilité des bétons ». DEA Géomatériaux. Division Bétons et Composites Cimentaires. Section Microstructure et Durabilité du Béton, LCPC 2003.
- [3] A. Ait-Mokhtar. « Durabilité des matériaux, transfert d'agents agressifs dans les matériaux cimentaires ». Habilitation à diriger des recherches en sciences, Université de la Rochelle, 2002.
- [4] M.Thiery « Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires. Prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurelles et hydriques ». Thèse de doctorat, Paris. LCPC 2005.

- [5] De Larrard. « La nouvelle méthode des coulis de l'AFREM pour la formulation des bétons à hautes performances ». Bulletin des LCP, Mars-Avril 1996 ;
- [6] Procédure de préconditionnement et d'essai : carbonatation accélérée. Division BCC-LCPC Paris, Avril 2006-version 1.
- [7] NF EN ISO 12571– Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment –Détermination des propriétés de sorption hygroscopique, 22p. Octobre 2000.
- [8] Essai de carbonatation accélérée, Mesure de l'épaisseur de béton carbonaté, Mode opératoire recommandé par l'AFREM. Compte rendu des journées techniques AFPC-AFREM « Durabilité des bétons », 11et12 Décembre 1997, Toulouse, pp:153-158.
- [9] Baroghel-Bouny V; Chaussadent T; Croquette G; Divet L; Gawséwitch J; Godin J; Henry D; Platret G et Villain G. Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité des bétons - Méthodes de mesures et d'essais de laboratoire, Méthodes d'essai n°58 dans: Techniques et Méthodes des Laboratoires des Ponts et Chaussées, L.C.P.C Paris, Février 2002, 87p.
- [10] Baroghel-Bouny V. « Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances », thèse de doctorat de l'E.N.P.C 1994.